নিম্ন তাপমাত্রা বিজ্ঞান

ডঃ দিলীপ কুমার চক্রবর্তী

পশ্চিমবঙ্গ রাজ্য পুস্তক পর্ষদ

নিম্নতাপমাত্রাবিজ্ঞান

(A Textbook on Cryogenics)

ডঃ দিলীপ কুমার চক্রবর্তী
এম.এস্‌সি. (স্বর্ণপদকপ্রাপ্ত),
পিএইচ্‌.ডি., বি.এড্‌., এফ্‌.আই.সি.সি.

পশ্চিমবঙ্গ রাজ্য পুস্তক পর্ষদ

NIMNATAPMATRABIJNAN
DR. DILIP KUMAR CHAKRABORTY

প্রথম প্রকাশ ঃ ফেব্রুয়ারী ১৯৭৯

প্রকাশক ঃ
পশ্চিমবঙ্গ রাজ্য পুস্তক পর্ষদ ;
৬এ রাজা সুবোধ মল্লিক স্কোয়ার,
কলিকাতা-৭০০ ০১৩।

মুদ্রক ঃ
সুরেশ দত্ত।
মডার্ন প্রিন্টার্স ;
১২ উল্টাডাঙ্গা মেন রোড ;
কলিকাতা-৭০০ ০৬৭।

প্রচ্ছদ ঃ
শ্রীহেমকেশ ভট্টাচার্য

Published by PROF. PRADYUMNA MITRA, Chief Executive Officer, West Bengal State Book Board under the Centrally Sponsored Scheme of production of books and literature in regional language at the University level, launched by the Government of India, the Ministry of Education and Social Welfare (Department of Culture), New Delhi.

উৎসর্গ

আমার বাবা

শ্রীহেমেন্দ্র চন্দ্র চক্রবর্তীকে

ও

আমার মা

৺সবিতা চক্রবর্তীকে ।

ভূমিকা

সম্প্রতি পশ্চিমবঙ্গ রাজ্য পুস্তক পর্ষদ মাতৃভাষায় উচ্চতর বিজ্ঞান ও অন্যান্য বিষয়ক পুস্তক প্রকাশনে ব্রতী হয়েছেন এতে সকলের কাছেই তাঁরা ধন্যবাদার্হ।

এঁদেরই উৎসাহে ও পৃষ্ঠপোষকতায় "নিম্নতাপমাত্রাবিজ্ঞান" বইটি প্রণয়ন করা সম্ভবপর হয়েছে। বাংলা ভাষায় উচ্চতর বিজ্ঞানের বেশ কিছু বই ইতিমধ্যেই প্রকাশিত হয়েছে এবং এখনও হচ্ছে। কিন্তু নিম্নতাপমাত্রাবিজ্ঞান বিষয়ক কোন বই মাতৃভাষায় লেখা হয়েছে বলে আমার জানা নেই।

আলোচ্য বিষয়টি আধুনিক বিজ্ঞানের বিভিন্ন শাখা প্রশাখার সঙ্গে ক্রমশঃই আরও বেশী জড়িত হয়ে পড়ছে এবং পদার্থ বিজ্ঞানের উচ্চতর অর্থাৎ সাম্মানিক স্নাতক এবং স্নাতকোত্তর শিক্ষাসূচীরও এটি একটি গুরুত্বপূর্ণ অংশ। এ সকল কারণেই আমি এই পুস্তকটি রচনার সংকল্প গ্রহণ করেছিলাম। আনন্দের কথা যে আমার এই প্রচেষ্টা রাজ্য পুস্তক পর্ষদের আনুকূল্য লাভে সমর্থ হয়েছে।

আমার লেখা বইটি এই বিষয়ের উপর মাতৃভাষায় রচিত প্রথম পুস্তক হওয়াতে এবং আমারও প্রথম পুস্তক রচনার প্রয়াস হওয়ার ফলে হয়ত নানা ত্রুটি বিচ্যুতি সুধীজনের নজরে পড়বে। কিন্তু আমার আশা যে বইটি অন্তত একটি গুরুত্বপূর্ণ আধুনিক বৈজ্ঞানিক বিষয়ের প্রতি সকলেরই দৃষ্টি আকৃষ্ট করবে।

ছাত্রছাত্রীদের প্রয়োজনের কথা ভেবে বইটির ভাষা সহজ ও সরল করার সাধ্যমত চেষ্টা করেছি। তাপগতিবিদ্যা ও সমষ্টি-পদার্থ বিজ্ঞান সংক্রান্ত তাত্ত্বিক আলোচনা সীমিত ও সংক্ষিপ্ত রেখেছি।

বইটির প্রকাশ প্রসঙ্গে সানন্দে জানাই Indian Cryogenics Council-এর সভাপতি আন্তর্জাতিক খ্যাতিসম্পন্ন নিম্নতাপমাত্রাবিজ্ঞানী পরমশ্রদ্ধেয় অধ্যাপক ডঃ অক্ষয়ানন্দ বসু মহাশয় অত্যন্ত যত্ন সহকারে সমগ্র পাণ্ডুলিপিটি পরীক্ষা করেছেন এবং বহু মূল্যবান উপদেশ দিয়ে বইটির ত্রুটি বিচ্যুতি দূর করতে এবং গুণগত উৎকর্ষ সাধনে প্রভূত সাহায্য করেছেন।

এছাড়া পুস্তকটি লেখা ও প্রকাশনে প্রথম থেকে উৎসাহদান করে এবং ছাত্রছাত্রী ও বিজ্ঞান-প্রেমী পাঠকসমাজের কাছে এটিকে আকর্ষণীয় করে তোলার ব্যাপারে সক্রিয়ভাবে সাহায্য করেছেন Indian Journal of Cryogenics-এর সম্পাদকমণ্ডলীর সদস্য বন্ধু-অধ্যাপক ডঃ রমেশচন্দ্র মিত্র। তাঁর কাছে আমি অশেষ ঋণী।

পশ্চিমবঙ্গ রাজ্য পুস্তক পর্ষদের প্রশাসন আধিকারিক অধ্যাপক প্রদ্যুম্ন মিত্র অশেষ ব্যস্ততার মধ্যেও প্রথমাবধি বইটির ব্যাপারে গভীর আগ্রহ প্রকাশ করেছেন। তাঁর সাহায্য ছাড়া হয়ত বইটির প্রকাশ সম্ভব হত না।

পর্ষদের কর্মীবৃন্দের সকলের কাছে আমি অকুণ্ঠ সহযোগিতা পেয়েছি। শ্রী এস. মিত্র ও শ্রীমতি শিপ্রা দত্ত অতি যত্নসহকারে আমার পুস্তকের চিত্রগুলি অঙ্কন করে আমার কৃতজ্ঞতাভাজন হয়েছেন। মডার্ন প্রিণ্টার্সের সত্ত্বাধিকারী শ্রীসুরেশ দত্ত মহাশয়ের সময়োচিত যত্নে ও পরিশ্রমে বইটির প্রকাশন অল্পদিনের মধ্যেই সম্ভব হয়েছে। এজন্য তিনি আমার ধন্যবাদার্হ।

সর্বশেষ ধন্যবাদ শ্রীমতি শিবানী চক্রবর্তীর প্রাপ্য। তাঁর উৎসাহ, অনুপ্রেরণা ও সহযোগিতা আমার পুস্তক রচনার প্রয়াসকে অনেকাংশে সহজতর করেছে।

দিলীপ কুমার চক্রবর্তী

সূচীপত্র

নিম্নভাগমাত্রাবিজ্ঞান

অবতরণিকা

'খুব শীতল' বললেই যার কথা প্রথমে মনে হয় তা হল বরফ। কথায় বলে 'বরফ শীতল'। কিন্তু প্রকৃতপক্ষে, বরফই শীতলতার সর্বোৎকৃষ্ট উদাহরণ নয়। বৈজ্ঞানিক ভাষায় বরফের তাপমাত্রা হল 0 ডিগ্রী সেণ্টিগ্রেড, কিন্তু এর চেয়েও নিম্নতাপমাত্রা সৃষ্টি করা খুব কঠিন নয়। যেমন বরফের সাথে সাধারণ লবণ মিশ্রিত করলে তার তাপমাত্রা 0 ডিগ্রী সেণ্টিগ্রেডের চেয়েও 20 ডিগ্রী পর্যন্ত নেমে যেতে পারে। আবার, এর চেয়েও কম তাপমাত্রা তো প্রকৃতিতেই সৃষ্ট হয়। মেরু অঞ্চলে শীতকালে তাপমাত্রা 0 ডিগ্রীর চেয়েও প্রায় 70 ডিগ্রী নীচে পর্যন্ত নেমে যেতে পারে। যদিও একে খুবই শীতল বলা যেতে পারে, কিন্তু তবুও একে শীতলতার চরম সীমা বলে ধরা হয় না। তাহলে, প্রশ্ন হতে পারে যে, তাপমাত্রা কতটা নামতে পারে? তার উত্তরে বলা যায় যে, তাপমাত্রা এতটা কমে যেতে পারে যে, সেই তাপমাত্রায় বায়ুর মত বস্তু, যা কিনা দেখা যায় না, তা অত্যন্ত শীতল হয়ে জলের মত তরল পদার্থে পরিণত হয়। শুধু বায়ু নয়, অত্যন্ত নিম্নতাপমাত্রায় অন্যান্য গ্যাসও তরলে পরিণত হতে পারে, এমন কি তাপমাত্রা খুবই কমে গেলে কোন গ্যাস কঠিনেও পরিণত হতে পারে। এইসব তাপমাত্রা যে কত কম তা সাধারণভাবে ভাবা কঠিন। কিন্তু বিজ্ঞানীরা এরূপ নিম্নতাপমাত্রার কথা শুধু ভাবেননি, বাস্তবে তা পরিণত করতেও সমর্থ হয়েছেন। বস্তুতপক্ষে তাঁরা এমন নিম্নতাপমাত্রা সৃষ্টি করতে সমর্থ হয়েছেন যা কিনা 0 ডিগ্রী সেণ্টিগ্রেড এর প্রায় 273 ডিগ্রী নীচে। কিন্তু, বিজ্ঞানীরা এরূপ তাপমাত্রা একদিনে সৃষ্টি করতে পারেন নি। দীর্ঘকাল তাঁরা এ বিষয়ে পরীক্ষা-নিরীক্ষা করেছেন, বহু তত্ত্বগত দিক পর্যালোচনা করেছেন। অবশেষে তাঁরা সফল হয়েছেন। নিম্নতাপমাত্রা নিয়ে বিজ্ঞানীদের এই সুদীর্ঘকালের পরীক্ষা-নিরীক্ষা ও তাত্ত্বিক পর্যালোচনা নিয়ে গড়ে উঠেছে বিজ্ঞানের একটি স্বতন্ত্রজগৎ, যার নাম নিম্নতাপমাত্রাবিজ্ঞান (Cryogenies)।

নিম্নতাপমাত্রাবিজ্ঞান বর্তমানকালে বিজ্ঞানের একটি বিশিষ্ট শাখা হিসাবে পরিণত হয়েছে। বিজ্ঞানের অনেক শাখাতেই এর যথেষ্ট প্রয়োগ হচ্ছে। নিম্নতাপমাত্রায় পদার্থবিজ্ঞান ও প্রযুক্তিবিজ্ঞানের বহু গবেষণা ও প্রয়োগ হচ্ছে। পরমাণু গবেষণা, মহাকাশ-গবেষণা, আনবিক জীববিজ্ঞান গবেষণা (Molecular Biology), কঠিন পদার্থবিজ্ঞান (Solid State Physics) গবেষণা প্রভৃতি

বিজ্ঞানের বিভিন্ন শাখার চর্চা ও প্রযুক্তিতেই এর সহায়তা অপরিহার্য হয়ে উঠেছে। অথচ, বিজ্ঞানের অনেক প্রাচীন শাখার তুলনায় নিম্নতাপমাত্রাবিজ্ঞান বয়স অনেক কম। কিঞ্চিদধিক দেড়শত বৎসর পূর্বে নিম্নতাপমাত্রা নিয়ে সঠিকভাবে চর্চা ও গবেষণার সূত্রপাত হয়, কিন্তু এখন একে বাদ দিলে আধুনিক বিজ্ঞানের অধিকাংশ শাখারই অগ্রগতি সম্ভবপর নয়।

নিম্নতাপমাত্রা বিজ্ঞান সম্পর্কে জানতে গেলে প্রথমে জানা প্রয়োজন কি করে নিম্নতাপমাত্রা সৃষ্টি করা যায়, তাকে রক্ষা করা এবং নিয়ন্ত্রণ করা যায়। তারপর জানতে হবে, কি করে সঠিকভাবে নিম্নতাপমাত্রা পরিমাপ করা যায়। কারণ, সঠিকভাবে নিম্নতাপমাত্রা পরিমাপ না করতে পারলে জানা যাবে না যে কতটা নিম্নতাপমাত্রা সৃষ্টি করা সম্ভব হল, বা সেই নিম্নতাপমাত্রায় পদার্থের সাধারণ ধর্মের কিরূপ পরিবর্তন ঘটল। আবার, অতিনিম্নতাপমাত্রায় পদার্থের বিভিন্ন ধর্মের সাধারণ পরিবর্তন তো ঘটেই, বহু ক্ষেত্রে অতি শৈত্যের ফলে পদার্থের মধ্যে কতকগুলি অভাবনীয়, অভিনব ও বিচিত্র ধর্মেরও উদ্ভব হতে পারে। এইসব ধর্মের সাথে তাপমাত্রা বা অন্যান্য পরিস্থিতি কিভাবে জড়িত, বিজ্ঞানীরা নানাবিধ তত্ত্বের সাহায্যে তা ব্যাখ্যা করার চেষ্টা করেছেন, যা না জানলে নিম্ন-তাপমাত্রাবিজ্ঞান সম্পর্কে সামগ্রিক ধারণা জন্মাবে না। এ ছাড়া বর্তমান যুগে বিভিন্ন বিষয়ে নিম্নতাপমাত্রার সাহায্য কিভাবে নেওয়া হচ্ছে তা না জানলে আধুনিক যুগে নিম্নতাপবিজ্ঞানের বিশিষ্ট ভূমিকাটি উপলব্ধি করা সম্ভব হবে না। বলতে কি, যে কোন প্রগতিকামী মানবগোষ্ঠী এখন সামগ্রিকভাবে নিম্নতাপমাত্রা-বিজ্ঞানের উপর নির্ভরশীল বললে অত্যুক্তি হবে না। গ্যাসের পৃথকীকরণ ও বিশুদ্ধিকরণ, ধাতুবিজ্ঞানের বিভিন্ন দিক, জ্বালানী সংক্রান্ত ও সার সংক্রান্ত গবেষণা, খাদ্য সংরক্ষণ, শক্তির উৎপাদন, সংরক্ষণ ও প্রেরণ, কৃষি, জীববিদ্যা, শল্য চিকিৎসা, ভেষজ বিজ্ঞান, পারমাণবিক শক্তি সংক্রান্ত গবেষণা, মহাকাশ অভিযান প্রভৃতি যেসকল অসংখ্য বিষয়ে নিম্নতাপমাত্রাবিজ্ঞানের প্রয়োগ হচ্ছে তা আলোচনা করা এই ক্ষুদ্র পুস্তকে সম্ভব নয়। সেজন্য এই পুস্তকে উপরিলিখিত বিষয়গুলির সামান্য কিছু আলোচিত হয়েছে।

প্রথম পরিচ্ছেদ

নিম্নতাপমাত্রা সৃষ্টি কৌশল

অতীতকালে হিমাঙ্ক অর্থাৎ বরফের তাপমাত্রাকেই যথেষ্ট নিম্নতাপমাত্রা বলে মনে করা হত। কিন্তু ক্রমে ক্রমে এই ধারণা পরিত্যক্ত হয়ে হিমাঙ্কের নীচের দিকের তাপমাত্রাকে নিম্নতাপমাত্রা বলে মনে করা হতে লাগল। কিন্তু প্রশ্ন হল, যে হিমাঙ্কের কত নীচে পর্যন্ত নিম্নতাপমাত্রায় পৌঁছান যায় তার কি কোন সীমা নির্ধারিত হয়েছে? তত্ত্বগতভাবে বলা যায় যে, 0 ডিগ্রী সেণ্টিগ্রেডের চেয়ে 273° ডিগ্রী (সূক্ষ্ম গণনায় 273·14°) নীচে পর্যন্ত তাপমাত্রা হওয়া সম্ভব। কারণ, বয়েল এর সূত্র (Boyles Law) থেকে আমরা পাই যে −273° সেণ্টিগ্রেড তাপমাত্রায় কোন আদর্শ গ্যাসের অণুগুলি তাপশূন্য হয়ে যাবে। এর থেকে বলা হয় যে, −273° সেণ্টিগ্রেড হচ্ছে নিম্নতাপমাত্রার সীমা এবং একে বলা হয় 'পরমশূন্য তাপমাত্রা' (Absolute zero temperature)। পরে, তাপগতিবিদ্যার (Thermodynamics) আলোচনা থেকেও এর সমর্থন পাওয়া গিয়াছে। হিমাঙ্কের নীচে থেকে এই পরমশূন্য তাপমাত্রা পর্যন্ত গড়ে উঠেছে এই নিম্নতাপমাত্রার জগৎ।

এখন প্রশ্ন হল, কি কি ভাবে নিম্নতাপমাত্রা সৃষ্টি করা যায়? বিভিন্ন উপায়ে বিজ্ঞানীরা নিম্নতাপমাত্রা সৃষ্টি করতে চেষ্টা করেছেন। সেই উপায়-গুলি হল,

(ক) বরফের সঙ্গে বিভিন্ন প্রকার লবণ মিশ্রিত করে,
(খ) নিম্নচাপে কোন তরল বস্তুকে বাষ্পায়িত করে,
(গ) কোন গ্যাসকে উচ্চচাপ থেকে নিম্নচাপে রুদ্ধতাপ ও সমএনট্রপীয় প্রসারণের সময় তাকে বাহ্যিক কার্য করতে দিয়ে,
(ঘ) কোন গ্যাসের মুক্ত প্রসারণ ঘটিয়ে,
(ঙ) জুল-টমসন প্রসারণকালে আভ্যন্তরীণ আনবিক কার্যের ফলে যে তাপের হ্রাস হয় (সমগ্র তাপ অপরিবর্তিত রেখে), তার দ্বারা,
(চ) তাপরুদ্ধ বিচৌম্বকন প্রণালীর দ্বারা,
(ছ) বিশোষণ প্রক্রিয়ার দ্বারা,
(জ) অন্যান্য প্রক্রিয়া যথা তাপবৈদ্যুতিক প্রতিক্রিয়ার সাহায্য নেওয়া ইত্যাদি।

এখন আমরা উপরে উল্লিখিত প্রক্রিয়াগুলি আলোচনা করছি।

(ক) বরফের সঙ্গে লবণ মিশ্রিত করা

এই প্রক্রিয়ায় বরফের সঙ্গে কোন নির্দিষ্ট পরিমাণে কোন বিশেষ লবণ যথাসম্ভব হিমাঙ্কে এনে তারপর মিশ্রিত করলে ঐ মিশ্রণের তাপমাত্রা হিমাঙ্কের নীচে একটি নির্দিষ্ট তাপমাত্রা পর্য্যন্ত নেমে যায়। এরূপ মিশ্রণকে বলা হয় 'হিমমিশ্রণ'। কত নিম্নতাপমাত্রা পর্যন্ত এইভাবে পোঁছান যাবে তা নির্ভর করছে কোন বিশেষ লবণটি ব্যবহার করা হয়েছে ও কতটা লবণ মেশান হয়েছে তার উপর। বলা বাহুল্য বাইরের তাপ হতে মিশ্রণকে যথাসম্ভব রক্ষা করতে হবে।

কিন্তু এভাবে তাপমাত্রা নামে কেন ? এর উত্তর হচ্ছে যে, যখন কোন লবণকে হিমাঙ্কের কাছাকাছি তাপমাত্রায় বরফের সাথে মিশ্রিত করা হয়, লবণ থেকে তাপ গ্রহণ করার ফলে কিছু বরফ গলে জল হয়। ঐ জলে কিছু লবণ দ্রবীভূত হয়ে লবণটির জলীয় দ্রবণ তৈরী করে। এই প্রক্রিয়ায় ঐ দ্রবণের তাপমাত্রা কমে যায়। কারণ, দ্রবণের জন্য যে লীন তাপ প্রয়োজন হয় তা ঐ দ্রবণ ও বরফ থেকেই আসে। এইভাবে, ঐ দ্রবণের তাপমাত্রা 0° ডিগ্রী সেণ্টিগ্রেডেরও নীচে নেমে যায়। আবার, লবণের জলীয় দ্রবণ বরফের সাথে সাম্য অবস্থায় থাকতে পারে না। ফলে, আরও বরফ গলে জল হয় এবং আরও লবণের জলীয় দ্রবণ তৈরী হয়। এর জন্য আরও লীনতাপ প্রয়োজন হয় এবং দ্রবণের তাপমাত্রা আরও কমতে থাকে। এইভাবে হিমমিশ্রণের তাপ-মাত্রা কমতে কমতে এমন একটি নির্দিষ্ট তাপমাত্রায় পৌঁছায়, যেখানে বরফ ও লবণের জলীয় দ্রবণ সাম্য অবস্থায় থাকে। এই নির্দিষ্ট তাপমাত্রাকে বলে ইউটেকটিক (eutectic) তাপমাত্রা। এই প্রক্রিয়ায় তাপমাত্রা হ্রাস করার কৌশল প্রয়োগ করে কুলপী বরফ তৈরী করা হয়। একটি বদ্ধমুখ পাত্রে দুধ চিনি মিশ্রিত করে রাখা হয়। তারপর, পাত্রটিকে বরফ ও লবণের মিশ্রণ দিয়ে সম্পূর্ণ ঢেকে দেওয়া হয়। অতঃপর পাত্রটিকে খুব দ্রুত ঘোরান হয়। তার ভলে, বরফ ও লবণ খুব ভালভাবে মিশে যায়, আবার দুধ চিনির মিশ্রণটিও সমানে ঠাণ্ডা হতে থাকে। ফলে, মিশ্রণটির তাপমাত্রা খুবই নেমে যায় এবং পাত্রের মধ্যে দুধ জমে কুলপী বরফে পরিণত হয়।

পরপৃষ্ঠায় ১নং স্তম্ভলেখতে হিমমিশ্রণের জন্য বিভিন্ন লবণের পরিমাণ ও তার সাহায্যে যে তাপমাত্রা সৃষ্টি করা যায় তা তুলনামূলকভাবে দেখান হয়েছে।

স্তম্ভলেখ ১ : বিভিন্ন লবণের সাহায্যে হিমমিশ্রণ ও তার সাহায্যে সৃষ্ট তাপমাত্রা

হিমমিশ্রণে ব্যবহৃত লবণের নাম	প্রতি 100 গ্রাম মিশ্রণে শুষ্ক লবণের পরিমাণ	তাপমাত্রা
ম্যাগনেসিয়াম সালফেট ($MgSO_4$)	19.0	−3.9°C
জিংক সালফেট ($ZnSO_4$)	27.2	−6.5°C
পটাশিয়াম ক্লোরাইড (KCl)	19.7	−11.1°C
এ্যামোনিয়াম ক্লোরাইড (NH_4Cl)	18.6	−15.8°C
সোডিয়াম ক্লোরাইড (NaCl)	22.4	−21.2°C
ম্যাগনেসিয়াম ক্লোরাইড (MgCl)	21.6	−33.6°C
ক্যালসিয়াম ক্লোরাইড ($CaCl_2$)	29.8	−55.0°C
জিঙ্ক ক্লোরাইড ($ZnCl_2$)	51.0	−62.0°C
পটাশিয়াম হাইড্রক্সাইড (KOH)	31.5	−65.0°C

(খ) কমচাপে তরলের বাষ্পায়ণ

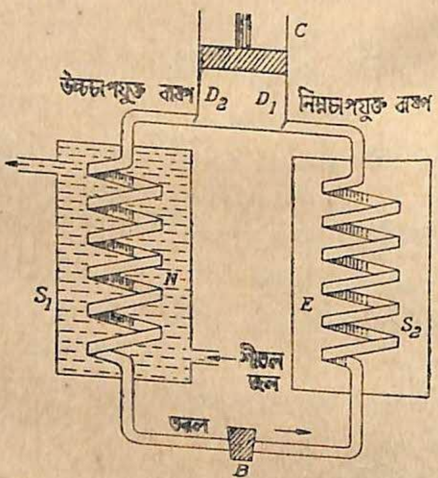
যদি কোন তরলকে কমচাপে রাখা হয়, তাহলে ঐটি দ্রুত বাষ্পায়িত হতে থাকে। এই বাষ্পায়ণের জন্য যে লীনতাপ প্রয়োজন হয়, তা তরল থেকেই গৃহীত হয়। যদি বাইরের থেকে তাপ প্রবেশ করতে দেওয়া না হয়, তাহলে তরলটি তাপ হারাতে থাকবে, এমন কি অবশেষে তরলটি কঠিনে পরিণত হতে পারে। এই নীতির উপর ভিত্তি করেই আধুনিক হিমায়ন যন্ত্রগুলি প্রস্তুত করা হয়। এই উপায়ে কতটা শৈত্য সৃষ্টি করা যাবে তা নির্ভর করে কি ধরনের তরল পদার্থ ব্যবহার করা হয়েছে, কত দ্রুত তরলটিকে বাষ্পায়িত করা

যাচ্ছে এবং কতটা তাপরুদ্ধভাবে প্রক্রিয়াটি করা হচ্ছে তার উপর। চাপের সঙ্গে স্ফুটনাঙ্কের সম্পর্কটিকে নিম্নলিখিত সমীকরণের সাহায্যে প্রকাশ করা যায়,

$$\frac{dp}{dT}=\frac{L}{T(v_g-v_l)}$$

এখানে L হল বাষ্পায়নের লীনতাপ, T তাপমাত্রা এবং v_g ও v_l হচ্ছে যথাক্রমে বাষ্প ও তরলের বিশিষ্ট আয়তন (specific volume)।

হিমায়ন যন্ত্রগুলি প্রধানতঃ দু ধরনের হয়—বাষ্প সংনমন শ্রেণীর ও বাষ্প-শোষণ শ্রেণীর। প্রথমে দেখা যাক বাষ্প সংনমন শ্রেণীর হিমায়ন যন্ত্রগুলি কিভাবে কাজ করে। এই শ্রেণীর হিমায়ন যন্ত্রে তিনটি প্রধান অংশ থাকে—সংনমক, বাষ্পায়ক ও শীতক। এইরূপ একটি যন্ত্রের চিত্র নীচে দেওয়া হল।



১নং চিত্র—বাষ্প সংনমন শ্রেণীর হিমায়ন যন্ত্র।

বাষ্পায়ক Eর মধ্যে যে হিমায়ক তরলটি থাকে তার বাষ্প মৃদু চাপযুক্ত। তা সংনমক Cরে ঊর্ধ্বগতির সময় কপাট D_1 এর মধ্য দিয়ে সংনমকের মধ্যে শোষিত হয় ও তার বাষ্পচাপ আনমিত হয়। ফলে তরলটি দ্রুত বাষ্পায়িত হয়, এবং বাষ্পায়নের লীনতাপ হারিয়ে তরলটি শীতল হয়। বাষ্পায়ক Eর পার্শ্ববর্তী অঞ্চলও ঠাণ্ডা হয়, কেননা বাইরের থেকে তাপ প্রবেশ বন্ধ করা হয় এই অংশটিকে তাপনিরোধী বস্তু দিয়ে আবৃত করে। আবার, সংনমক Cর নিম্নগতির সময় শোষিত বাষ্পটি সংনমিত হয়। এর চাপে D_1 কপাট বন্ধ হয় ও D_2 কপাট খুলে যায় এবং বাষ্পটি শীতক কুণ্ডলী Nর মধ্যে প্রবেশ

করে। ঐ কুণ্ডলীটিকে শীতল জলের প্রবাহ দ্বারা সর্বদাই ঠাণ্ডা রাখা হয়। ফলে ঐটির মধ্যে বাষ্পটি সংনমন তাপ হারিয়ে তরলে পরিণত হয়। এই উচ্চ চাপযুক্ত তরলটি আবার নিয়ন্ত্রক কপাট B খুলে বাষ্পায়ক Eর মধ্যে ঢোকে। কারণ, বাষ্পায়কের মধ্যে চাপ কম। আবার, সংনমক Cর উর্দ্ধগতির সময় বাষ্পায়কের মধ্যস্থ তরলের কমচাপযুক্ত বাষ্প সংনমকের মধ্যে গৃহীত হয়। অতঃপর ঐটি পুনরায় সংনমিত হয়ে ফিরে যায়। এইভাবে পুনঃ পুনঃ বাষ্পটিকে একবার তরলায়িত ও অন্যবার বাষ্পায়িত করার ফলে বাষ্পায়কের চারপাশের তাপমাত্রা খুবই কমে যায়। ফলে ঐস্থানে জল বা কোনরূপ জলীয় দ্রবণ রাখলে তা জমে যায়।

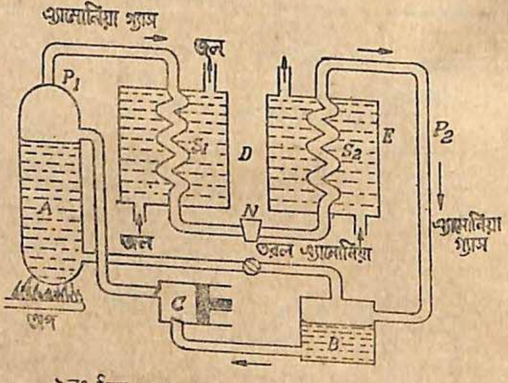
স্তম্ভলেখ ২ ঃ কতকগুলি 'হিমায়কের' তুলনামূলক বৈশিষ্ট্য

হিমায়কের নাম	স্বাভাবিক স্ফুটনাংক	$-15°C$ তাপমাত্রায় বাষ্পচাপ (এ্যাটম./সে.মি.)	বাষ্পায়কের মধ্যে বাষ্পের বিশিষ্ট আয়তন সি. সি./গ্রাম	$-15°C$ তাপ-মাত্রায় বাষ্পায়নের শীলতাপ ক্যালরি/গ্রাম
এ্যামোনিয়া	-33.35	2.33	508.9	313.8
সালফার ডাইঅক্সাইড	-10.1	·803	400.6	97.5
কার্বনডাই অক্সাইড	-78.6	22.7	16.66	63.7
ফ্রিয়ন	-29.8	1.80	92.7	38.6

কিন্তু, একটা বিষয় মনে রাখতে হবে যে, সকলপ্রকার তরলকেই হিমায়ক হিসাবে ব্যবহার করা সংগত নয়। কারণ, প্রকৃষ্ট হিমায়ক হিসাবে ব্যবহৃত হতে গেলে তরলের কতকগুলি বৈশিষ্ট্য থাকা দরকার। যেমন, প্রথমতঃ তরলটির বাষ্পায়নের লীনতাপের পরিমাণ বেশী হওয়া দরকার। দ্বিতীয়তঃ, তরলের বাষ্পটির খুব কম 'আপেক্ষিক আয়তন' থাকবে। তৃতীয়তঃ বাষ্পটির স্ফুটনাংক কম হবে এবং চতুর্থতঃ বাষ্পায়কের তাপমাত্রায় তরলটির মোটামুটি ভাবে যথেষ্ঠ পরিমাণ বাষ্পচাপ থাকবে, তা না হলে সংনমকের বাষ্পায়নজনিত কাজ বেড়ে যাবে। চতুর্থতঃ, তরলটি এমন হওয়া দরকার যেন ঐটির বাষ্প সংনমিত ও শীতল হওয়ার পর খুব সহজেই তরলে পরিণত হতে পারে অর্থাৎ কিনা তরলটির সংকট তাপমাত্রা ও চাপ দুইই কম হবে। পঞ্চমতঃ

তরলটি ও তার বাষ্প যেন সাধারণ তাপমাত্রায় কোনরূপ রাসায়নিক বিক্রিয়া না ঘটায়, বা তার কোন বিষক্রিয়া না থাকে। এইসব বৈশিষ্ট্যগুলির দিকে লক্ষ্য রেখে যেসব তরলকে হিমায়ক হিসাবে ব্যবহার করা যেতে পারে তাদের কয়েকটির কিছু কিছু তুলনামূলক বৈশিষ্ট্য পূর্বপৃষ্ঠায় ২য় স্তম্ভলেখতে দেওয়া হল, এদের মধ্যে সালফারডাই অক্সাইড ও ফ্রিয়ন উভয়ের বাষ্পচাপ এবং স্বাভাবিক স্ফুটনাংক অপেক্ষাকৃত কম। কিন্তু ফ্রিয়নের বাষ্পায়নের লীনতাপ খুব কম বলে ফ্রিয়ন বেশী ব্যবহৃত হয়।

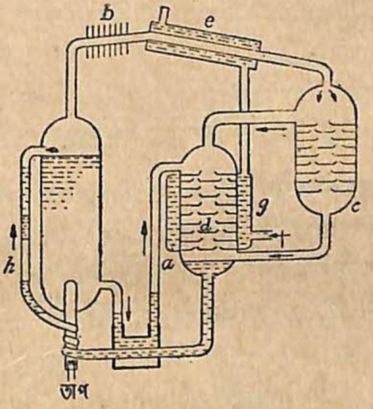
বাষ্পশোষণ শ্রেণীর হিমায়ন যন্ত্রে যে তরলকে হিমায়ক হিসাবে ব্যবহার করা হয়, তার বাষ্পকে অন্য একটি উচ্চ স্ফুটনাঙ্কের তরলের মধ্যে দ্রুত শোষণ করা হয়। তার ফলে, হিমায়ক তরলটির বাষ্পায়ন খুব দ্রুত হয়। এইরূপ একটি যন্ত্রের চিত্র নীচে দেওয়া হল।



২নং চিত্র—বাষ্পশোষণ শ্রেণীর হিমায়ন যন্ত্র।

A পাত্রে অ্যামোনিয়ার তীব্র জলীয় দ্রবণ থাকে। ঐটিকে উত্তপ্ত করলে এ্যামোনিয়া গ্যাস দ্রবণ থেকে নির্গত হয়ে উচ্চ চাপে Dর মধ্যে রাখা S_1 কুণ্ডলীতে প্রবেশ করে। কুণ্ডলীটির চারপাশে ঠাণ্ডা জল প্রবাহিত। এই উচ্চচাপে ও ঠাণ্ডায় কুণ্ডলীর মধ্যে গ্যাসটি তরল এ্যামোনিয়ায় পরিণত হয়। এই তরল এ্যামোনিয়া কপাট N দিয়ে Eর মধ্যেকার S_2 কুণ্ডলীতে প্রবেশ করে এবং নিম্নচাপের জন্য পুনরায় গ্যাসে পরিণত হয়। ঐ পাত্রের মধ্যে যে তরলকে ঠাণ্ডা করা হবে তা রাখা হয়। এ্যামোনিয়া গ্যাসটি পুনরায় শোষক B তে এ্যামোনিয়ার লঘু দ্রবণে শোষিত হয় ও S_2 তে নিম্নচাপের কারণ ঘটায়। ফলে, ঐটির মধ্যে এ্যামোনিয়ার গাঢ় দ্রবণ প্রস্তুত হয়। এই দ্রবণ আবার পাম্পের সাহায্যে A তে পাঠান হয়।

এই ধরনের হিমায়ন যন্ত্রের অসুবিধা হল যে এর শীতল করবার ক্ষমতা খুব বেশী নয়। তাছাড়া, তরলকে পাম্প করে তোলার জন্য এর মধ্যে ঘূর্ণ্যমান অংশ থাকে। এসব অসুবিধা দূর করার জন্য এক ধরনের হিমায়ন যন্ত্রের উদ্ভাবন হয়েছে যার মধ্যে কোনরূপ ঘূর্ণ্যমান অংশ থাকে না। এইরূপ একটি যন্ত্রের কার্যপদ্ধতির বিবরণ সংক্ষেপে দেওয়া হচ্ছে, যন্ত্রটির নাম ইলেকট্রোলাক্স (Electrolux) হিমায়ন যন্ত্র। এইরূপ যন্ত্রে ডালটনএর আংশিক চাপসূত্র প্রয়োগ করা হয়। নীচে যন্ত্রটির ছবি দেওয়া হল।



৩নং চিত্র—ইলেকট্রোলাক্স শ্রেণীর হিমায়ন যন্ত্রের নক্সা।

এতে একটি লম্বা খাড়া ইস্পাতের চোঙ আছে। ঐটির মধ্যে এ্যামোনিয়ার গাঢ় দ্রবণ রাখা হয়। চোঙের কেন্দ্র দিয়ে একটি নল রাখা হয়, যার মধ্যে একটি তাপকুণ্ডলী থাকে। ঐ কুণ্ডলীকে বৈদ্যুতিক শক্তির দ্বারা উত্তপ্ত করে চোঙের মধ্যস্থ অ্যামোনিয়া দ্রবণকে গরম করলে তা থেকে এ্যামোনিয়া গ্যাস উচ্চ চাপে নির্গত হয় এবং তা পার্শ্বস্থ নল দিয়ে সংশোধকের মধ্য দিয়ে শীতক কুণ্ডলী *e*র মধ্যে ঢোকে। সংশোধক *b*র মধ্যে জলীয় বাষ্প জলে পরিণত হয়ে চোঙে ফিরে আসে এবং এ্যামোনিয়া গ্যাসটি তরল কুণ্ডলীতে প্রবেশ করে সাধারণ তাপমাত্রায় ফিরে আসে এবং তরল এ্যামোনিয়ায় পরিণত হয়। তারপর ঐটি উদ্বায়ক *c* তে প্রবেশ করে, উদ্বায়কের মধ্যে প্রায় 9 বায়ুচাপে হাইড্রোজেন গ্যাস, অথচ এ্যামোনিয়ার আংশিক চাপ 1 বায়ুচাপের সমান থাকে। তার ফলে উদ্বায়কে প্রবেশ করে এ্যামোনিয়া আপেক্ষিক নিম্নচাপে গ্যাসে পরিণত হয় এবং হাইড্রোজেন গ্যাসের সাথে মিশ্রিত হয়। এই মিশ্রণ বিশুদ্ধ হাইড্রোজেন থেকে ভারী। ফলে ঐ গ্যাসমিশ্রণ নীচে নেমে আসে এবং

নল দিয়ে শোষক d তে প্রবেশ করে। শোষক dর মধ্যে এ্যামোনিয়ার লঘু দ্রবণের সাথে এ্যামোনিয়া গ্যাস মিশ্রিত হয়। ফলে ঐ দ্রবণ গাঢ় হয়, হাইড্রোজেন গ্যাস মুক্ত হয়ে নল দিয়ে পুনরায় উদ্বায়কে ফিরে যায় এ্যামোনিয়ার গাঢ় দ্রবণ শোষক এর তলায় যায় এবং নল দিয়ে চোঙের মধ্যে প্রবেশ করে। কারণ, চোঙের মধ্যে এ্যামোনিয়ার দ্রবণটি তাপকুণ্ডলীর সাহায্যে উত্তপ্ত হওয়ার ফলে ঐটির মধ্যে পরিবহণ স্রোতের সৃষ্টি হয়। চোঙের মধ্যস্থিত এ্যামোনিয়া দ্রবণ উত্তপ্ত হলে ঐটির থেকে এ্যামোনিয়া গ্যাস নির্গত হয়। ফলে, দ্রবণটি লঘু হয়ে যায় এবং পার্শ্বস্থ নল দিয়ে শোষকএ যায়। এইভাবে এই হিমায়ন প্রক্রিয়া অবিরাম গতিতে চলে।

গ্যাসের তরলীকরণ দ্বারা নিম্নতাপ সৃষ্টি করা

বরফে বিভিন্ন প্রকার লবণ মিশ্রিত করে বা নিম্নচাপে সাধারণ তরলকে বাষ্পায়িত করে আইসক্রিম তৈরী করা চলে বটে, কিন্তু প্রকৃতপক্ষে তাপমাত্রা ঐসব প্রক্রিয়ায় খুব বেশী নামান যায় না। ঊনবিংশ শতকের গোড়ার দিকে কোন কোন বিজ্ঞানী চিন্তা করলেন যে, সাধারণ তাপমাত্রায় গ্যাসীয় অবস্থায় আছে এমন কোন পদার্থকে যদি তরলে পরিণত করতে হয় তবে তার তাপমাত্রা কোন প্রক্রিয়ায় সাধারণ স্ফুটনাঙ্কে নামাতে হবে। অতঃপর তাকে তরলে পরিণত করলে তার তাপমাত্রা নেমে যাবে এবং সেই তরলায়িত গ্যাসকে দ্রুত বাষ্পায়িত করলে তার তাপমাত্রা আরও নেমে যাবে। কিন্তু মূল সমস্যাটি হল, কি করে গ্যাসকে তরলে পরিণত করা যায়। যদিও কোন সাধারণ তরল পদার্থকে তাপ দিয়ে উত্তপ্ত করে তাকে গ্যাসে পরিণত করা খুব কঠিন নয়, কিন্তু তার বিপরীত প্রক্রিয়াটি অর্থাৎ কোন সাধারণ গ্যাসকে তরলে পরিণত করা অতো সহজ নয় এবং কখনও কখনও অত্যন্ত দুরূহও বটে। বিজ্ঞানীরা এ নিয়ে চিন্তা করেছিলেন, কিন্তু কি উপায় অবলম্বন করলে কোন গ্যাসকে তরলায়িত করা যাবে সেটাই তাঁদের কাছে স্পষ্ট হচ্ছিল না। কেউ কেউ অনুমান করলেন যে গ্যাসকে সংনমিত করলে গ্যাসের অণুগুলি আরও কাছাকাছি আসবে এবং গ্যাসের তাপমাত্রা কমালে অণুগুলির তাপশক্তি কমে যাবে, কাজেই, সংনমন ও তাপহ্রাসকরণ—এই দুই প্রক্রিয়ায় মিলিতভাবে প্রয়োগ করলে কোন গ্যাসকে তরলে পরিণত করা যেতে পারে।

বিজ্ঞানী ফ্যারাডেকে (Faraday) এই ধরণের প্রচেষ্টার পথিকৃৎ বলা যেতে পারে। তিনি ১৮২৩ সালে একটি বাঁকান শক্ত নলের দ্বারা তৈরী U-আকৃতির

দুইমুখ বন্ধ নল নিলেন, যার একটি বাহুর মধ্যে ক্লোরিন চুন (chlorine salt) উত্তপ্ত করা হল যাতে বিমুক্ত ক্লোরিন উচ্চ চাপে নলের অন্য বাহুটিতে প্রবেশ করল। এটিকে এখন একটি বরফপূর্ণ পাত্রে রেখে ঠাণ্ডা করা ক্লোরিন গ্যাসকে হলুদ বর্ণের একটি তরল পদার্থে পরিণত হতে দেখা গেল। অনুরূপ প্রক্রিয়ায় ফরাসী বিজ্ঞানী থিলোরিয়েৱ (Thilorier) ১৮৩৫ সালে কার্বন ডাই অক্সাইড গ্যাসকে তরলে পরিণত করতে সমর্থ হন। এই পদ্ধতি প্রয়োগ করে ফ্যারাডে ও অন্যান্য অনেকে কিছু গ্যাসকে তরল করতে সমর্থ হন। কিন্তু নাইট্রোজেন, অক্সিজেন, হাইড্রোজেন প্রভৃতি কিছু কিছু গ্যাসকে এই পদ্ধতিতে কিছুতেই তরল করা গেল না। তখন মনে করা হল যে, এইসব গ্যাসকে কখনই তরলে পরিণত করা যাবে না। তাই তাদের নাম দেওয়া হল 'স্থায়ীগ্যাস'।

কিন্তু এই 'স্থায়ী গ্যাসগুলি' সম্পর্কে বিজ্ঞানীদের ধারণা বদলাল যখন এ্যানড্রু ১৮৬৩ সালে 'সংকট তাপমাত্রা ও চাপমাত্রার কথা প্রথম বললেন। এ্যানড্রুর (Andrew) বিখ্যাত CO_2 পরীক্ষা প্রমাণ করল যে, যে সকল পদার্থ সাধারণতঃ গ্যাসীয় অবস্থায় থাকে, তাদের ক্ষেত্রে এমন একটি তাপমাত্রা থাকবে, যার উপরে গ্যাসটিকে কখনই তরলায়িত করা যাবে না। যতই কেন না চাপ প্রয়োগ করা হোক। কাজেই, কোন গ্যাসকে তরলে পরিণত করতে হলে তাকে পূর্বে সংকট তাপমাত্রার নীচে ঠাণ্ডা করতে হবে এবং অন্ততঃ সংকট চাপমাত্রায় সংনমিত করতে হবে। নীচে কতকগুলি গ্যাসের সংকট তাপমাত্রা দেওয়া হল ঃ

স্তম্ভলেখ ৩ ঃ **বিভিন্ন গ্যাসের সংকট তাপমাত্রা**

গ্যাসের নাম	স্বাভাবিক বায়ুচাপে স্ফুটনাংক −°C	সংকট তাপমাত্রা −°C
কার্বন-ডাই-অক্সাইড	−78·6	−102·9
মিথেন	−161·37	−183·15
অক্সিজেন	−182·95	−218·40
নাইট্রোজেন	−195·78	−209·86
হাইড্রোজেন	−252·76	−259·14
হিলিয়াম	−268·83	−259·14

যে সব বিভিন্ন প্রক্রিয়া অবলম্বন করে বিজ্ঞানীরা বিভিন্ন গ্যাসকে তরলে পরিণত করতে পেরেছেন, সেই সব প্রক্রিয়ার সম্পর্কে নীচে আলোচনা করা হচ্ছে।

সংনমিত গ্যাসের রুদ্ধতাপভাবে মুক্ত প্রসারণ পদ্ধতিতে গ্যাসের তরলীকরণ

কোন গ্যাসকে সমতাপীয় অবস্থায় খুব উচ্চ চাপ প্রয়োগে সংনমিত করে যদি সহসা তাকে রুদ্ধতাপভাবে প্রসারিত হতে দেওয়া হয়, তাহলে তার তাপমাত্রা খুব বেশী নেমে যাবে, কারণ রুদ্ধতাপভাবে প্রসারিত হতে গিয়ে গ্যাসটিকে মুক্তপ্রসারণ জনিত বাহ্যিক কার্য করতে হবে, যদিও সে সময় অন্তর্নিহিত শক্তির (Internal energy) কোন পরিবর্তন ঘটবে না। এই প্রক্রিয়ার ফলে তাপমাত্রা কত কমবে তা একটি সূত্র থেকে ধারণা করা যাবে। যদি প্রসারণের পূর্বেকার তাপমাত্রা ও চাপের মান যথাক্রমে T ও p হয় এবং প্রসারণের পরে ঐগুলির মান যথাক্রমে T' ও p' হয়, তবে

$$T' = T(p'/p)^{(\gamma-1)/\gamma} \qquad \cdots(i)$$

γ হচ্ছে গ্যাসটির স্থির চাপে আপেক্ষিক তাপের (C_p) ও স্থির আয়তনে আপেক্ষিক তাপের (C_v) অনুপাত, অর্থাৎ

$$\gamma = C_p/C_v$$

এই প্রক্রিয়ার সাহায্যে কার্বন ডাই অক্সাইড গ্যাসকে খুবই সহজে ঘণীভূত করে কঠিনে পরিণত করা সম্ভব হল।

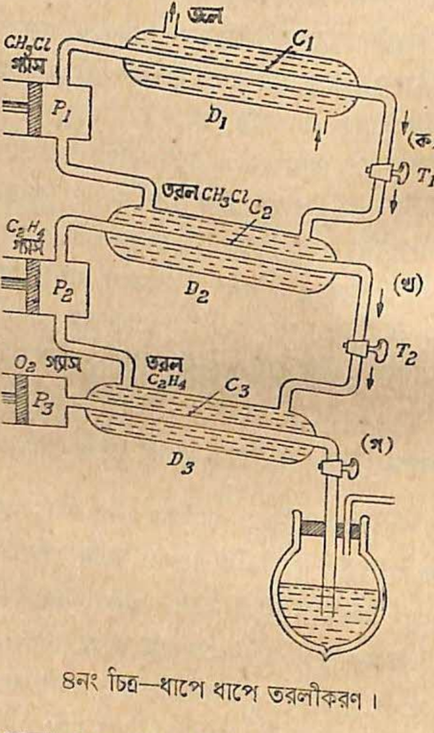
ফরাসী বিজ্ঞানী কেইলেতে (Cailletet) ১৮৭৭ সালে এই পদ্ধতি প্রয়োগ করে 'স্থায়ীগ্যাস' অক্সিজেনকে তরলে পরিণত করতে সমর্থ হলেন, তিনি প্রথমে গ্যাসটিকে $-29°C$ তাপমাত্রায় একটি দৃঢ় সরু নলের মধ্যে আবদ্ধ রেখে তাকে 200 বায়ুচাপে সংনমিত করে পরীক্ষা করছিলেন। ভাগ্যক্রমে একটি কপাট আকস্মিকভাবে মুক্ত হওয়ায় বায়ুচাপ সহসা বিমুক্ত হয়ে গেল ও নলের মধ্যে কুয়াশার আস্তরণের মত তরল অক্সিজেন দৃশ্যমান হল, কিন্তু তা দ্রুত মিলিয়ে গেল। এরপর, সুইস বিজ্ঞানী পিকতে (Pictet) আরও বেশী চাপে, প্রায় 320 বায়ুচাপে অক্সিজেনকে সংনমিত করলেন এবং তাকে কম চাপে বাষ্পায়মান তরল কার্বন ডাই অক্সাইডএর সাহায্যে $-100°C$ তাপমাত্রায় শীতল করলেন। এরপর একটি সরু নলের মুখ খুলে দিয়ে ঐ সংনমিত অক্সিজেনের চাপ সহসা কমিয়ে

দেওয়া হল। সরু নলের মুখ দিয়ে তরল অক্সিজেনের তীব্রস্রোত বের হয়ে আসতে দেখা গেল, কিন্তু তা তৎক্ষণাৎ বাষ্পে পরিণত হল, মূলতঃ এই পদ্ধতি পরবর্তীকালীন অবরোহন পদ্ধতি ও জুল-টমসন পদ্ধতির আদিম সংস্করণ। কেইলেতে পদ্ধতি প্রয়োগ করে পোলিশ বিজ্ঞানীদ্বয় রোবলেউস্কি (Wroblewski) ও অলজেউস্কি (Alzewski) ১৮৮৪ সালে তরল হাইড্রোজেনের হালকা কুয়াশার মত ক্ষণস্থায়ী আস্তরণ তৈরী করতে সক্ষম হলেন। অবশ্য ১৮৯৩ সালে অলজেউস্কি সংনমিত ও শীতল হাইড্রোজেন গ্যাসের চাপ সহসা কমিয়ে দিয়ে বেশ কিছুটা তরল হাইড্রোজেন পেলেন। পরবর্তীকালে সাইমন (Simon) এই পদ্ধতিকে উন্নত করে অল্প মূলধন পরীক্ষাগারে হিলিয়াম তরলীকরণে প্রচুর প্রয়োগ করেছেন। কিন্তু এইভাবে গ্যাসকে তরল করা খুব একটা ফলপ্রসূ হল না, কারণ, এই প্রক্রিয়ায় গ্যাসকে তাৎক্ষণিকভাবে তরল করা যায়, কিন্তু অবিরত ভাবে না। কিন্তু এই প্রক্রিয়াকে অন্যান্য প্রক্রিয়ার সঙ্গে প্রয়োগ করলে, এটি একটি উৎকৃষ্ট প্রক্রিয়া হতে পারে, যেমন সাইমন পদ্ধতি। অন্যদিকে, পিকতে পদ্ধতিকে উন্নত করে ডেওয়ার (Dewar) হাইড্রোজেনকে তরলায়িত করেন। ওনেস্‌ও (Onnes) তো হিলিয়াম গ্যাসকে তরলায়িত করতে এই পদ্ধতির সাহায্য নিয়েছেন, পরে সে সম্পর্কে আলোচিত হবে।

অবরোহন পদ্ধতিতে তরলায়িত করা

ধাপে ধাপে বা অবরোহন প্রক্রিয়ায় গ্যাসকে তরল করার পদ্ধতিটি পিকতে প্রচলিত প্রথার উন্নত সংস্করণ, যা তিনি ১৮৭১ সালে অক্সিজেন তরলীকরণে প্রয়োগ করেছিলেন। পদ্ধতিটি খুবই সরল, পরীক্ষাগারেও এই পদ্ধতি সহজে প্রয়োগ করা যায়। অবশ্য, পদ্ধতিটি একেবারে নতুন নয়। ফ্যারাডে যে পদ্ধতিতে উচ্চচাপ ও শৈত্য একই সাথে প্রয়োগ করে গ্যাসকে তরলায়িত করতে চেষ্টা করেছিলেন, এটি মূলতঃ তাই, কেবল বিভিন্ন ধাপে বিভিন্ন তরল নিয়ে এই পদ্ধতির পুনরাবৃত্তি করে ধাপে ধাপে গ্যাসের তাপমাত্রা কমিয়ে ফেলে তাকে শীতল করে অবশেষে তাকে তরলায়িত করা হয়। এই পদ্ধতি অবলম্বন করে কামেরলিঙ্‌ ওনেস্‌ (Kemmerling Onnes) ও কীজম (Keesom) অক্সিজেন গ্যাসকে তরলায়িত করেন। পরের পৃষ্ঠায় পদ্ধতিটি ছবি দিয়ে বুঝিয়ে দেওয়া হল। ৪নং ছবিতে দেখা যাচ্ছে যে, প্রথম স্তরে (ক) শীতক D_1-র মধ্যে কুণ্ডলীর ভিতর দিয়ে সংনমিত মিথাইল ক্লোরাইড গ্যাসকে প্রবাহিত করা হয়। ঐ শীতকের মধ্যে শীতল জলের প্রবাহের ফলে মিথাইল ক্লোরাইড গ্যাস তরলে

পরিণত হয়। কারণ, মিথাইল ক্লোরাইড গ্যাসের সংকট তাপমাত্রা 134° সেণ্টিগ্রেড। এই তরল মিথাইল ক্লোরাইড দ্বিতীয় স্তরে (খ) শীতক D_2-র মধ্যে প্রবেশ করে। আবার, (ক) স্তরের পাম্পের শোষক ক্রিয়ার সময় তরল মিথাইল ক্লোরাইড বাষ্পীভূত হয়। ফলে, ঐটির তাপমাত্রা −90° সেণ্টিগ্রেডে নেমে যায়। তারফলে, শীতক D_2-র মধ্যে যে কুণ্ডলীটি আছে তার ভিতর দিয়ে প্রবাহিত সংনমিত ইথিলিন গ্যাস তরলে পরিণত হয়। যেহেতু, ইথিলিন



৪নং চিত্র—ধাপে ধাপে তরলীকরণ।

গ্যাসের সংকট তাপমাত্রা হচ্ছে 10° সেণ্টিগ্রেড। ঐ তরল ইথিলিন আবার তৃতীয় স্তরে (গ) শীতক D_3-র মধ্যে প্রবেশ করে, কিন্তু পূর্বের ন্যায় খ স্তরের পাম্পের শোষক ক্রিয়ার সময় বাষ্পীভূত হয়। ফলে ঐটির তাপমাত্রা −160° সেণ্টিগ্রেডে নেমে যায়। এখন, শীতক D_3-র মধ্যস্থিত কুণ্ডলীর ভিতর সংনমিত অক্সিজেন গ্যাস প্রবাহিত করে তাকে সহজেই তরল করা যায়। তরল অক্সিজেনের সংকট তাপমাত্রা −118° সেণ্টিগ্রেড এবং স্ফুটনাংক −183° সেণ্টিগ্রেড। এই তরল অক্সিজেনকে বাষ্পীভূত করে তাপমাত্রা −218° সেণ্টিগ্রেড পর্যন্ত নামান যায় এবং এই যে যে গ্যাসের সংকট তাপমাত্রা এর চেয়ে বেশী তাদের সহজেই

তরলায়িত করা যায়। এইজন্য বায়ুর সংকট তাপমাত্রা -140° সেণ্টিগ্রেড হওয়ায় বায়ুকে তরল করা যায়। কিন্তু, হাইড্রোজেনের সংকট তাপমাত্রা -240° সেণ্টিগ্রেড ও হিলিয়ামের $-267{\cdot}84^\circ$ সেণ্টিগ্রেড হওয়ায় তাদের তরলায়িত করা যায় না।

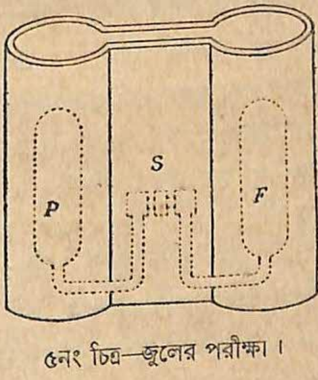
জুলটমসন পদ্ধতি

গ্যাসকে তরলায়িত করার পক্ষে এটি একটি বিশেষ কার্যকর পদ্ধতি। এই পদ্ধতিটি যে নীতি অনুযায়ী কার্য করে তা হল এই যে, যদি কোন গ্যাসের অণুগুলির মধ্যে পারস্পরিক আকর্ষণ থাকে, তাহলে গ্যাসটি যখন প্রসারিত হবে, তখন ঐ আকর্ষণকে অতিক্রম করতে গিয়ে গ্যাসটিকে কার্য করতে হবে। ফলে, গ্যাসটির প্রসারণের জন্য গ্যাসটি শীতল হবে এটা আশা করা যায়।

এই নীতির সত্যতা প্রথমে জুল ১৮৪৫ সালে পরীক্ষা করে দেখেন। পরে, আবার ১৮৫২ সালে লর্ড কেলভিন (পূর্ববর্তী নাম স্যার উইলিয়াম টমসন) এর সহায়তায় পুনরায় ঐ পরীক্ষাকার্য চালালেন।

জুলের প্রথম পরীক্ষা

জুল দুটো একইরকম দেখতে পাত্র (P ও F) নিলেন। পাত্র দুটি একটি ষ্টপককৃযুক্ত সরু বাঁকান নল দ্বারা পরস্পরের সাথে সংযুক্ত। এবার, পাত্রদুটিকে



৫নং চিত্র—জুলের পরীক্ষা।

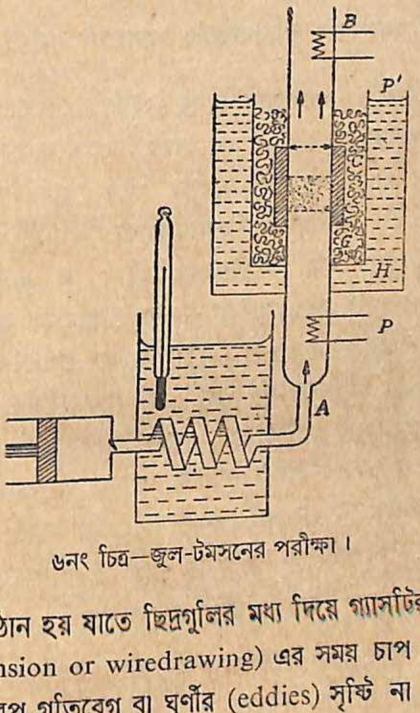
একটি ক্যালরিমিটারের (তাপমানক) অভ্যন্তরস্থ জলের মধ্যে ডুবিয়ে রাখা হল। একটি খুব সূক্ষ্মভাবে এবং নিখুঁতভাবে তাপমাত্রা পরিমাপ করতে

পারে এমন থার্মমিটারের সাহায্যে তাপমাত্রা মাপার ব্যবস্থা হল। P পাত্রটিকে 22 বায়ুচাপে বায়ু দ্বারা ভর্ত্তি করা হল, অথচ F পাত্রটি সম্পূর্ণ খালি রাখা হল। ষ্টপককটি খোলামাত্র P পাত্রের বায়ু F পাত্রে গিয়ে প্রসারিত হল। এই প্রসারণ ক্রিয়ায় আপাতদৃষ্টিতে কোন বাহ্যিক কার্যের দরকার হল না। এখন, যদি গ্যাসটির অনুগুলির মধ্যে পারস্পরিক আকর্ষণ থেকে থাকে, তাহলে ঐ আকর্ষণ বলকে ছিন্ন করতে গ্যাসটিকে কাজ করতে হবে এবং তাহলে সেই কাজ করতে গিয়ে গ্যাসটি যে পরিমাণ আভ্যন্তরীণ শক্তি হারাবে, তার ফলে গ্যাসটি শীতল হবে। তাহলে, সেক্ষেত্রে তাপমানকের জলও কিছুটা শীতল হবে। কিন্তু জুল লক্ষ্য করলেন যে, তাপমানকের জল শীতল বা উষ্ণ কিছুই হল না। কাজেই তিনি সিদ্ধান্ত করলেন যে, আন্তঃ আণবিক শক্তির অস্তিত্ব নেই। কিন্তু প্রকৃতপক্ষে, এই প্রক্রিয়ার ফলে বাস্তব গ্যাসগুলির ক্ষেত্রে সামান্য কিছুটা তাপমাত্রার তারতম্য ঘটা উচিৎ ছিল, যা কিনা জুলের এই ধরনের পরীক্ষা-ব্যবস্থায় ধরা পড়ল না। এখানে দ্রষ্টব্য এই যে P ও F পাত্র দুটি বিভিন্ন তাপমানকে ডোবানো থাকলেও, আন্তঃ আণবিক শক্তির কথা আপাততঃ না ধরলে, F পাত্রে তাপমাত্রা বৃদ্ধি ও P পাত্রে তাপমাত্রা সমান হ্রাস লক্ষ্য করা যেত। এই প্রক্রিয়াই জুল–গেলুসাক্ (Joule Gaylussac) সম্প্রসারণ নামে অভিহিত ও কেইলেতে তরলীকরণ পদ্ধতির মূলে।

জুল—টমসনের পরীক্ষা

আবার ১৯৫২ সালে জুল ও টমসন মিলিতভাবে আর একটি পরীক্ষাকার্য চালান। এই পরীক্ষার পরীক্ষাধীন গ্যাসটিকে একটি পাম্পের সাহায্যে অত্যন্ত বেশী চাপে সংনমিত করে এবং সংনমনের ফলে যে তাপের উদ্ভব হয় তা একটি প্রবহমান শীতল জলের কুণ্ডে ডোবানো তামার কুণ্ডলীর ভিতর দিয়ে গ্যাসটিকে প্রবাহিত করে দূর করা হয়। থার্মমিটারের সাহায্যে ঐ কুণ্ডের তাপমাত্রা স্থির আছে কিনা তা যাচাই করে নেওয়া হয়। তারপর, ঐ ঠাণ্ডা গ্যাসকে একটি চওড়া নল ABর মধ্যে দুটি সচ্ছিদ্র ধাতব পাতের মধ্যে ন্যস্ত অসংখ্য ছিদ্রযুক্ত ছিপির মধ্য দিয়ে চালিত করা হয়। যাতে গ্যাসটি এবং তার পারিপার্শ্বিকের মধ্যে তাপের আদান-প্রদান না ঘটে সেজন্য নলের যে অংশে ছিদ্রযুক্ত ছিপিটি আছে সেই অংশকে কাঠের দ্বারা তৈরী করা হয়। ঐ অংশটি আবার একটি চওড়া পাত্র D দ্বারা ঘেরা থাকে। ঐ পাত্রের মধ্যে তূলা ভর্ত্তি করা থাকে। আবার G পাত্রটি আরও একটি চওড়া পাত্র

H দ্বারা ঘেরা থাকে। এখন, ঐ ছিদ্রযুক্ত ছিপিটির মধ্যে ঢোকার পূর্বে ও পরে গ্যাসটির তাপমাত্রা সঠিকভাবে মাপার জন্য দুটি প্ল্যাটিনাম রোধ-থার্মমিটার PP' ব্যবহার করা হয়। ছিদ্রযুক্ত ছিপির মধ্য দিয়ে গ্যাসটিকে



৬নং চিত্র—জুল-টমসনের পরীক্ষা।

খুব ধীরে ধীরে পাঠান হয় যাতে ছিদ্রগুলির মধ্য দিয়ে গ্যাসটির থ্রটল প্রসারণের (Throttle expansion or wiredrawing) এর সময় চাপ অনেক কমে যায়, কিন্তু আবার কোনরূপ গতিবেগ বা ঘূর্ণীর (eddies) সৃষ্টি না হয়।

পরীক্ষার ফলাফল

সাধারণ-তাপমাত্রায়, হাইড্রোজেন ও হিলিয়াম ছাড়া সব গ্যাসই এই থ্রটল প্রসারণের সময় শীতল হয়। আর, উপযুক্ত নিম্ন তাপমাত্রায়, সব গ্যাসই শীতল হয়, যদি সেই সাথে উপযুক্ত চাপবিন্যাস করা যায়। গ্যাসের এইরূপ শীতল হওয়া, যার নাম জুল-টমসন শীতলীকরণ, ছিদ্রযুক্ত ছিপির দুইদিকের চাপের পার্থক্যের সাথে সাধারণতঃ সমানুপাতী হতে দেখা যায়।

প্রারম্ভিক তাপমাত্রাটি যতই বৃদ্ধি পাবে, ততই জুল টমসন শীতলতার পরিমাণও কমবে। প্রারম্ভিক তাপমাত্রা একটি নির্দিষ্ট মানের উর্দ্ধে হলে তাপবৃদ্ধি এবং নিম্নে হলে তাপহ্রাস হবে। এই তাপমাত্রাকে বলা হয় উৎক্রম

তাপমাত্রা (Temperature of Inverion)। এটির মান গ্যাসটির প্রারম্ভিক তাপমাত্রা, চাপমাত্রা ও আণবিক আকর্ষণ বিকর্ষণের উপর নির্ভর করে।

পরীক্ষামূলক ফলাফলের সাধারণ ব্যাখ্যা

এই পরীক্ষাকার্যটির ফলাফলের ব্যাখ্যা এইরূপে দেওয়া যায়। ধরা যাক, গ্যাসটির একক ভর ছিদ্রযুক্ত ছিপির মধ্য দিয়ে গিয়ে থ্রটল প্রসারণ লাভ করেছে। মনে করা যাক যে, থ্রটল প্রসারণ লাভের পূর্বে, গ্যাসটির চাপ, আয়তন ও অন্তর্লীন (internal) শক্তির মান হল যথাক্রমে p_1, v_1 ও u_1 এবং থ্রটল প্রসারণের পর ঐগুলির মান হল যথাক্রমে p_2, v_2 ও u_2, এখানে p_1, p_2র চেয়ে বড় এবং v_1, v_2র চেয়ে ছোট। থ্রটল প্রসারণের পূর্বে গ্যাসটির উপর বাহ্যিক কার্যের পরিমাণ হল p_1v_1 এবং থ্রটল প্রসারণের পরে ঐ কার্যের পরিমাণ হল p_2v_2। এখন, যদি মনে করা যায় যে, ছিদ্রযুক্ত ছিপির উভয় দিকে গ্যাসটির বেগ একই থাকে এবং থ্রটল প্রসারণের সময় গ্যাস পারিপার্শ্বিকের মধ্যে তাপের আদানপ্রদান ঘটে না, তাহলে ছিদ্রযুক্ত ছিপির উভয় দিকে গ্যাসটির একক আয়তনের এনথাল্পি (enthalpy) বা সমগ্র শক্তির অর্থাৎ কিনা $u+pv$র পরিমাণ একই থাকবে। কাজেই, $u_1+p_1v_1=u_2+p_2v_2$......(2)

এখন, তিন প্রকারের ক্ষেত্র বিবেচনা করতে হবে।

প্রথমতঃ, আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে এবং বয়েল তাপমাত্রায় (Boyle Temperature)* বাস্তব গ্যাসের ক্ষেত্রে, $p_1v_1=p_2v_2$, কাজেই $u_1=u_2$ এবং যেহেতু অন্তর্লীন শক্তি u তাপমাত্রার সাথে সমানুপাতী, থ্রটল প্রসারণের এবং পরে গ্যাসটির তাপমাত্রা একই থাকবে।

দ্বিতীয়তঃ যদি গ্যাসটিতে আন্তঃআণবিক আকর্ষণের অস্তিত্ব থাকে, তাহলে এই আকর্ষণকে উপেক্ষা করে প্রসারিত হতে গিয়ে গ্যাসটিকে অতিরিক্ত কাজ করতে হবে। তখন, $p_2v_2>p_1v_1$ হবে। আবার, যদি গ্যাসটি বয়েল তাপমাত্রার* নীচে থাকে, তাহলেও $p_2v_2>p_1v_1$ হবে। তখন, $u_2<u_1$ হবে। ফলে, থ্রটল প্রসারণের জন্য গ্যাসটি শীতল হবে। কার্বন-ডাইঅক্সাইড, নাইট্রোজেন প্রভৃতি গ্যাসের ক্ষেত্রে এটা লক্ষ্য করা যায়।

---

* প্রত্যেক বাস্তব গ্যাসের ক্ষেত্রে এমন একটি তাপমাত্রা পাওয়া যায় যে তাপমাত্রায় pvর মান মোটামুটিভাবে ধ্রুবক হয়। এই তাপমাত্রার নাম বয়েল তাপমাত্রা।

তৃতীয়তঃ, যদি গ্যাসটির তাপমাত্রা বয়েল তাপমাত্রার উপরে থাকে, তাহলে $p_2v_2 < p_1v_1$ হবে। তখন $u_2 > u_1$ হবে, অর্থাৎ গ্যাসটি থ্রটল প্রসারণের ফলে উত্তপ্ত হবে। কিন্তু যদি আবার গ্যাসটিতে আন্তঃ আণবিক আকর্ষণ থেকে থাকে, তাহলে $p_2v_2 > p_1v_1$ হবে। তখন আবার, $u_2 < u_1$ হবে, অর্থাৎ কিনা গ্যাসটি শীতল হবে। এই দুই ধরনের ক্রিয়ার মধ্যে যেটি প্রধান হবে, সেটির ফলে গ্যাসটি শীতল বা উত্তপ্ত হবে। যেমন, হাইড্রোজেন বা হিলিয়াম গ্যাসের ক্ষেত্রে গ্যাসটি উত্তপ্ত হয়।

জুল-টমসন শীতলতার প্রকাশন

মনে করা যাক, কোন গ্যাসের 1 গ্রাম অণুর চাপ, আয়তন ও পরম তাপমাত্রার পরিমাণ ছিদ্রযুক্ত ছিপির উচ্চচাপের দিকে যথাক্রমে p_1, v_1, T_1 এবং নিম্ন চাপের দিকে যথাক্রমে p_2, v_2 ও T_2। এখন, গ্যাসটির উপর যে কার্য করা হয়েছে তার পরিমাণ হল p_1v_1 এবং গ্যাসটি যে কার্য করেছে তার পরিমাণ হল p_2v_2, কাজেই, থ্রটল প্রসারণের জন্য গ্যাসটি মোটমাট যে পরিমাণ কার্য করেছে তার পরিমাণ হল,

$$w_1 = p_2v_2 - p_1v_1$$

এখন, যে সব গ্যাস ভ্যানডার ওয়ালের গ্যাস সমীকরণ অনুযায়ী সাধারণতঃ কার্য করে তাদের ক্ষেত্রে গ্যাস সমীকরণটি এইভাবে লেখা হয়,

$$\left(p + \frac{a}{v_2}\right)(v - b) = RT \qquad \ldots \quad (3)$$

a ও b হচ্ছে ধ্রুবক, R হচ্ছে গ্যাস ধ্রুবক। এই সমীকরণে $\frac{a}{v^2}$ পদটি আন্তঃ-আণবিক আকর্ষণ বলের বিরুদ্ধে গ্যাসের কার্যের পরিমাণ বোঝায়। কাজেই, থ্রটল প্রসারণের ক্ষেত্রে আন্তঃ আণবিক শক্তির বিরুদ্ধে গ্যাসের কার্যের পরিমাণ হল

$$w_2 = \int_{v_1}^{v_2} \frac{a}{v^2}\, dv = \frac{a}{v_1} - \frac{a}{v_2}$$

কাজেই, গ্যাসটি থ্রটল প্রসারণের ফলে যে পরিমাণ কার্য করে, তা হল,

$$w = w_1 + w_2 = p_2v_2 - p_1v_1 + \frac{a}{v_1} - \frac{a}{v_2} \qquad \ldots \quad (4)$$

এখন, ভ্যানডার ওয়াল গ্যাস সমীকরণকে এইভাবে লেখা যায়,

$$pv = RT - \frac{a}{v} + pb \quad \ldots \quad (5)$$

($\frac{a}{v^2}$ খুব ছোট বলে উপেক্ষা করা হল)

কাজেই, $w = RT_2 - \frac{a}{v_2} + p_2 b - (RT_1 - \frac{a}{v_1} + p_1 b) + \frac{a}{v_1} - \frac{a}{v_2} \ldots$

বা, $w = R(T_2 - T_1) + \frac{2a}{v_1} - \frac{2a}{v_2} - b(p_1 - p_2) \quad \ldots \quad (6)$

T_1 ও T_2 খুব কাছাকাছি বলে আমরা ধরতে পারি

$$T_1 \simeq T_2 \simeq T$$

এবং $T_2 \sim T_1 = \delta T$ ও $p_1 \sim p_2 = \delta p$

কাজেই, আমরা লিখতে পারি,

$$\frac{1}{v_1} = \frac{p_1}{RT}$$

এবং $\frac{1}{v_2} = \frac{p_2}{RT}$

কাজেই, (6)নং সমীকরণকে এইভাবে লেখা যায়

$$w = -R\delta T + \frac{2a}{RT}(p_1 - p_2) - b(p_1 - p_2)$$

$$= -R\delta T + \left(\frac{2a}{RT} - b\right)\delta p \quad \ldots \quad (7)$$

এখন, $w = C_v dT$,

C_v = স্থির আয়তনের গ্যাসের আণবিক 'আপেক্ষিক তাপ' কারণ, গ্যাসটি w পরিমাণ কার্য করবার ফলে তার তাপমাত্রা δT কমে যায়।

কাজেই, $C_v \delta T = -R\delta T + \left(\frac{2a}{RT} - b\right)\delta p \quad \ldots \quad (8)$

অথবা, $(C_p - R)\delta T = -R\delta T + \left(\frac{2a}{RT} - b\right)\delta p$

কারণ, $C_p = C_v + R$

C_p = স্থির চাপে গ্যাসের আণবিক 'আপেক্ষিক তাপ',

সুতরাং $C_p \delta T = \left(\frac{2a}{RT} - b\right)\delta p$

অথবা, $$\frac{\delta T}{\delta p}=\frac{\left(\frac{2a}{RT}-b\right)}{C_p} \qquad \dots (9)$$

এখানে, $\frac{\delta T}{\delta p}$ হল প্রতি একক পরিমাণ চাপের প্রভেদের ফলে কতটা জুল-টমসন শীতলতা হবে তার পরিমাণ।

এখন, তিন প্রকার সম্ভাবনা হতে পারে,

প্রথমতঃ, $\frac{2a}{RT_i}=b$, অর্থাৎ প্রারম্ভিক তাপমাত্রা T_i এমন হতে পারে যে, তার ফলে $\frac{\delta T}{\delta p}$ শূন্য হবে। এই তাপমাত্রাকে বলা হয় উৎক্রম তাপমাত্রা।

আবার, গ্যাসের বয়েল তাপমাত্রা হল $T_b=\frac{a}{Rb}$ এবং সঙ্কট তাপমাত্রা (Critical temperature) T_c হল, $T_c=\frac{8a}{27Rb}$

কাজেই, আমরা লিখতে পারি

$$T_i=\frac{2a}{Rb}=2Tb=\frac{27T_c}{4}=6{\cdot}75T_c$$

দ্বিতীয়তঃ (9)নং সমীকরণকে এইভাবে লেখা যায়

$$\frac{\delta T}{\delta p}=\frac{b}{C_p}\left(\frac{2a}{RbT}-1\right)=\frac{b}{C_p}\left(\frac{T_i}{T}-1\right) \qquad \dots (10)$$

যদি $T<T_i$ হয়, তাহলে $\frac{\delta T}{\delta p}$ ধনাত্মক হবে। তাহলে, থ্রটল প্রসারণের ফলে গ্যাসটি ঠাণ্ডা হবে। T, T_i-এর যত নীচে হবে, তত এই শীতলতার পরিমান বেশী হবে। কার্বন ডাই অক্সাইড, নাইট্রোজেন প্রভৃতি গ্যাসের ক্ষেত্রে এটা দেখা গিয়েছে।

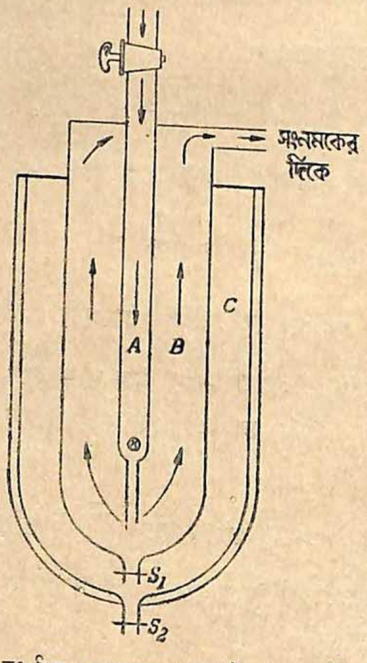
তৃতীয়তঃ, যদি $T>T_i$ হয়, তাহলে $\frac{\delta T}{\delta p}$ ঋণাত্মক হবে। তাহলে গ্যাসটি থ্রটল প্রসারণের জন্য উত্তপ্ত হবে। হাইড্রোজেন ও হিলিয়াম গ্যাসের ক্ষেত্রে এটা দেখা গিয়েছে।

পুনঃসম্ভূত জুল-টমসন শীতলতার মূল-তথ্য

আমরা পূর্বেই আলোচনা করেছি যে, যদি কোন উচ্চচাপে সংনমিত গ্যাসকে প্রথমে তার উৎক্রম তাপমাত্রার নীচের তাপমাত্রায় ঠাণ্ডা করা হয় এবং

তারপর তার থ্রটল প্রসারণ ঘটান হয়, তবে সেই প্রসারণের ফলে গ্যাসটি শীতল হবে। যেহেতু কোন গ্যাসের উৎক্রম তাপমাত্রা তার সংকট তাপমাত্রার বেশ উপরে থাকে, কোন গ্যাসকে এইভাবে ঠাণ্ডা করতে হলে তার প্রারম্ভিক তাপমাত্রা খুব বেশী নামানর প্রয়োজন নেই। কাজেই, জুল-টমসন পদ্ধতি গ্যাসকে শীতল করার পক্ষে একটা কার্যকরী পদ্ধতি।

কিন্তু এই পদ্ধতির একটি বড় ত্রুটি হল এই যে, কোন গ্যাসকে তার উৎক্রম তাপমাত্রার অনেক নীচে ঠাণ্ডা না করলে জুল-টমসন শীতলতার পরিমাণ যথেষ্ট বেশী হয় না। এই ত্রুটি দূর করার জন্য এবং জুল-টমসন শীতলতার পরিমাণ বৃদ্ধি করার জন্য একটি কৌশল অবলম্বন করা হয়, যাকে বলা হয় পুনঃসম্ভূত শীতলতার পদ্ধতি। এই পদ্ধতিতে গ্যাসটির কিছু অংশকে জুল-টমসন প্রক্রিয়ার দ্বারা কিছুটা শীতল করার পর সেই শীতল গ্যাস যখন বহির্মুখী হয়



৭নং চিত্র—পুনঃসম্ভূত জুল-টমসন পদ্ধতি।

তাকে দিয়েই অপেক্ষাকৃত তপ্ত অন্তর্মুখী প্রবাহকে শীতল করা হয়, চিত্রের দ্বারা বিষয়টি বোঝান হচ্ছে।

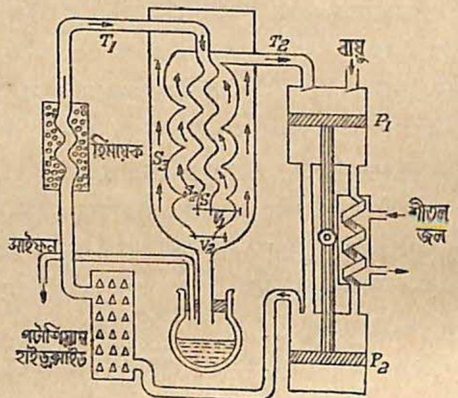
পূর্বে শীতল করা সংনমিত গ্যাসটি পুনর্চালক কুণ্ডলী Aর মধ্যে প্রবেশ করে এবং S_1 কপাটে তার থ্রটল প্রসারণ ঘটে। ফলে ঐটি কিছুটা শীতল হয়। এই শীতল গ্যাস আবার A ও B নলের মধ্যবর্তী অংশ দিয়ে ওপরে ওঠে এবং A অংশে যে সংনমিত গ্যাস নেমে আসছে তাকে শীতল করে। এই অপেক্ষাকৃত শীতল গ্যাসের আবার S_1 কপাটে থ্রটল প্রসারণ ঘটে। আবার, প্রথমে গ্যাসের যে অংশটুকু শীতল হয়েছিল তা A ও Bর মধ্যবর্তী অংশে প্রবেশ করে পুনরায় সংনমিত হয় এবং A দিয়ে নেমে এসে S_1 কপাটে তার থ্রটল প্রসারণ ঘটে। কাজেই, এইভাবে, গ্যাসটির কিছু সংনমিত অংশ A নল দিয়ে নেমে এসে S_1 কপাটে থ্রটল প্রসারিত হয়ে ঠাণ্ডা হয় এবং সেই অংশ আবার A ও Bর মধ্যবর্তী স্থান দিয়ে ওপরে ওঠার সময় A নলের মধ্য দিয়ে গ্যাসের যে অংশ সংনমিত হয়ে নীচে নেমে আসছে তাকে শীতল করে। সেটি আবার S_1 কপাটে থ্রটল প্রসারিত হয়ে ঠাণ্ডা হয়। এইভাবে গ্যাসটি পুনঃ পুনঃ থ্রটল প্রসারণের ফলে ক্রমাগত শীতল হতে থাকে এবং অবশেষে জুল-টমসন শীতলতার পরিমাণ এত বেশী হয় যে গ্যাসটি তরল হয়ে পড়ে। তখন S_2 কপাট খুলে তাকে একটি পাত্রে সংগ্রহ করা হয়। এখানে একটি বিষয় লক্ষ্য করতে হবে যে, গোটা প্রক্রিয়াটি যাতে তাপরুদ্ধ অবস্থায় ঘটে তার জন্য এই ব্যবস্থাকে একটি দ্বিস্তরবিশিষ্ট বায়ুশূন্য কক্ষ 'C'-র মধ্যে রাখা হয়।

লিণ্ডের পুনঃসম্ভূত পদ্ধতিতে বায়ুশীতলীকরণ

লিণ্ডে ১৮৯৫ সালে এই পদ্ধতিতে প্রথম বায়ুকে তরলায়িত করতে সমর্থ হন। যেহেতু বায়ুর ক্ষেত্রে বয়েল তাপমাত্রা এবং উৎক্রম তাপমাত্রা (Inversion Temperature) দুইই ঘরের তাপমাত্রার উপরে, কোনভাবে (সাধারণ কোন হিমমিশ্রণ দ্বারা অথবা বাষ্প সংনমন যন্ত্র দ্বারা) বায়ুর তাপমাত্রা $-20°$ সেণ্টিগ্রেড পর্যন্ত কমিয়ে দিতে পারলে সহজেই জুল-টমসন ক্রিয়া ঘটতে পারে।

লিণ্ডের যন্ত্রটির চিত্র (৮নং) পরবর্তী পৃষ্ঠায় দেওয়া হয়েছে। P_1P_2 হল একটি দ্বিস্তর বা ত্রিস্তর সংনমক (Two or three stage compressor), P_1 দ্বারা গ্যাসকে সাধারণ বায়ুচাপ থেকে 20 বায়ুচাপ পর্যন্ত সংনমিত করা হয় এবং P_2 দ্বারা ঐ বায়ুকে 20 থেকে 200 বায়ুচাপ পর্যন্ত সংনমিত করা হয়। প্রথমে বায়ুমণ্ডল থেকে বায়ুকে P_1 এ টেনে নিয়ে তাকে 20 বায়ুচাপে সংনমিত করা হয়। এর ফলে যে তাপসৃষ্টি হল তা দূর করার জন্য শীতল জলের প্রকোষ্ঠের মধ্য দিয়ে চালনা করা হয়। এইবার ঐ বায়ুকে P_2র সাহায্যে 200 বায়ুচাপে

সংনমিত করা হয়। তারপর ঐ সংনমিত বায়ুকে কষ্টিক-পটাশপূর্ণ স্তম্ভের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত করে তাকে কার্বন ডাই অক্সাইড ও জলীয় বাষ্পমুক্ত করা হয়। ঐ শুষ্ক ও কার্বন ডাই অক্সাইডমুক্ত বায়ুকে এবার হিমায়ক যন্ত্রের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত করে তার তাপমাত্রা -20° সেণ্টিগ্রেডে নামিয়ে আনা হয়।



৮নং চিত্র—লিণ্ডের তরলীকরণ পদ্ধতি।

এরপর, ঐ শীতল ও সংনমিত বায়ু T_1 নল দিয়ে তরলকের আভ্যন্তরীণ নলে (S_1) প্রবেশ করে এবং V_1 কপাটে এসে তার থ্রটল প্রসারণ ঘটে। এই থ্রটল প্রসারণের পর বায়ুর চাপ কমে গিয়ে 20 বায়ুচাপের সমান হয়। ফলে ঐ বায়ুর তাপমাত্রা -78° সেণ্টিগ্রেড হয়। এরপর ঐ বায়ু S_2 নল দিয়ে উপরে উঠতে থাকে এবং S_1 নল দিয়ে যে বায়ু নেমে আসছে তাকে শীতল করে। এবার ঐ 20 বায়ুচাপের বায়ু T_2 নল দিয়ে সংনমক P_2 তে পৌঁছায় এবং সেখানে 200 বায়ুচাপে পুনরায় সংনমিত হয়। সেখান থেকে আবার হিমায়ক-এর মধ্য দিয়ে শীতল হয়ে পুনরায় তা T_1 দিয়ে S_1 নলের মধ্যে প্রবেশ করে। এইভাবে বারংবার সংনমন ও থ্রটল প্রসারণের ফলে বায়ুটি যথেষ্ট শীতল হয়ে যায় এবং V_2 কপাটে এসে ঐটির দ্বিতীয়বার থ্রটল প্রসারণ ঘটে। ফলে ঐটির চাপ কমে 1 বায়ুচাপের সমান হয় এবং ঐটি জুল-টমসন শীতলীকরণ প্রক্রিয়ায় তরল বায়ুতে পরিণত হয়। ঐ তরল বায়ু ডেওয়ার ফ্লাস্কে D তে জমা হয় এবং ঐখান থেকে সাইফনের সাহায্যে তাকে বের করে নেওয়া হয়। বায়ুর যে অংশ তরল হল না, তা বাইরের নল S_3 দিয়ে উপরে উঠে যায় এবং তার ফলে S_1 ও S_2র মধ্যস্থিত বায়ু আরও শীতল হয়।

লিণ্ডের যন্ত্রটির সাহায্যে সহজেই বায়ুকে তরল করা যায় বলে এটি বাণিজ্যিকভাবে প্রচুর ব্যবহৃত হয়েছে।

সমএনট্রপীয় শীতলীকরণ প্রক্রিয়া

যখন কোন উচ্চ চাপে সংনমিত গ্যাসকে তাপরুদ্ধ অবস্থায় বাইরের চাপের বিরুদ্ধে কার্য করে সমএনট্রপীয়ভাবে প্রসারিত হতে দেওয়া হয়, তখন সেটি শীতল হয়ে যায়। যেহেতু এইভাবে গ্যাসটি যে কার্য করে তা অত্যন্ত দ্রুত-গতিতে হয়, তাই কার্য করতে যে শক্তির প্রয়োজন হয় তা গ্যাসটির নিজের আনবিক গতিশক্তি (Molecular Kinetic energy) থেকেই সংগৃহীত হয়। ফলে, গ্যাসটির তাপমাত্রা হ্রাস পায়। এই শীতলতার পরিমাণ খুবই বেশী এবং এটি আদর্শ বা প্রকৃত, সর্বপ্রকার গ্যাসের ক্ষেত্রেই ঘটে থাকে।

যদিও পদ্ধতি হিসাবে এটি খুবই উৎকৃষ্ট, কিন্তু তবুও এটি প্রয়োগ করতে গেলে সবচেয়ে যে অসুবিধা বেশী হয় তা হল যে, পদ্ধতিটি অবিরাম চলে না বলে এটির তাপগতিবিদ্যা সম্মত কার্যকারিতা কমে যায়। আরও একটি অসুবিধা হল যে, প্রসারণ ইঞ্জিনের গতিশীল অংশের (rotor) জন্য উপযুক্ত মসৃণকারক তেল (lubricating oil) পাওয়া যায় না। কারণ, এই পদ্ধতিতে তাপমাত্রা এত নেমে যায় যে, সাধারণতঃ ব্যবহৃত মসৃণকারক তেলগুলি জমে কঠিন হয়ে যায়।

এখন, জুল-টমসন শীতলীকরণ পদ্ধতি ও সমএনট্রপীয় শীতলীকরণ পদ্ধতির মধ্যে কতকগুলি মৌল পার্থক্য আছে। যথা, প্রথমতঃ জুল-টমসন শীতলীকরণ প্রক্রিয়া ঘটতে গেলে গ্যাসের প্রারম্ভিক তাপমাত্রা তার উৎক্রম তাপ-মাত্রার নীচে হওয়া চাই। কিন্তু সমএনট্রপীয় শীতলীকরণ প্রক্রিয়া সকল প্রারম্ভিক তাপমাত্রাতেই ঘটতে পারে।

দ্বিতীয়তঃ, সমএনট্রপীয় শীতলীকরণে এনট্রপী স্থির থাকে, কিন্তু জুল-টমসন শীতলীকরণে এনট্রপী স্থির থাকে না, বরং সমগ্র শক্তি (enthalpy) স্থির থাকে।

তৃতীয়তঃ জুল-টমসন শীতলীকরণের কারণ হল প্রকৃত গ্যাসের অনুগুলির মধ্যে পারস্পরিক আকর্ষণের বিরুদ্ধে গ্যাসের আভ্যন্তরীণ কার্য করা। আর সমএনট্রপীয় শীতলীকরণের কারণ হচ্ছে, বাইরের চাপের বিরুদ্ধে গ্যাসের বাহ্যিক কার্য করা।

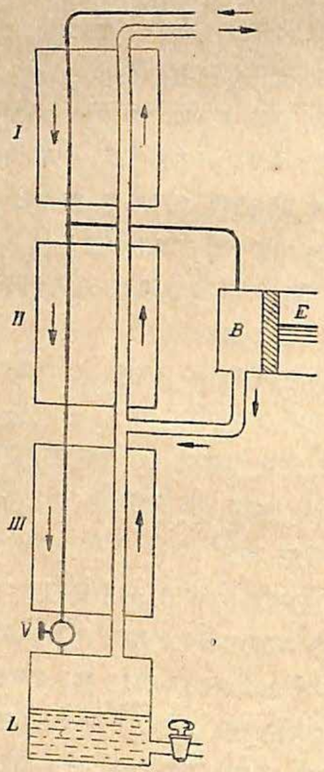
চতুর্থতঃ সাধারণ ক্ষেত্রে সমএনট্রপীয় শীতলীকরণের পরিমাণ বেশী, অথচ জুল-টমসন শীতলীকরণের পরিমাণ কম।

পঞ্চমতঃ জুল-টমসন শীতলীকরণ প্রকৃত গ্যাসগুলির ক্ষেত্রে ঘটে থাকে শুধুমাত্র বয়েল তাপমাত্রা বা উৎক্রম তাপমাত্রার নীচে, কিন্তু সমএনট্রপীয় শীতলীকরণ সর্বক্ষেত্রেই ঘটে থাকে।

ক্লডের তরলীকরণ যন্ত্র

ক্লড একপ্রকার তরলীকরণ যন্ত্র তৈরী করেন, যে যন্ত্রে তাপরুদ্ধ প্রসারণ এবং জুল-টমসন প্রসারণ—এই উভয় প্রক্রিয়াকেই কাজে লাগান হয়।

আমরা পূর্বেই আলোচনা করেছি যে, তাপরুদ্ধ প্রসারণ প্রক্রিয়ায় শীতলী-



৯নং চিত্র—ক্লডের তরলীকরণ যন্ত্রের নক্সা।

করণের প্রধান অসুবিধা হল এই যে, তাপমাত্রা খুব বেশী নেমে গেলে মসৃণকারক তেলগুলি জমে যায়। ক্লড এই অসুবিধা দূর করার জন্য পেট্রোলিয়াম ইথার

প্রভৃতি জাতীয় হাইড্রোকার্বন ব্যবহার করেন। এগুলি -140° সেণ্টিগ্রেড বা এমন কি -160° সেণ্টিগ্রেড তাপমাত্রা পর্যন্ত জমে যায় না। কাজেই, বায়ুর সংকট তাপমাত্রা অর্থাৎ -140° সেণ্টিগ্রেড তাপমাত্রায় পৌঁছতে কোন অসুবিধা হয় না। পূর্ব পৃষ্ঠায় ক্লডের তরলীকরণ যন্ত্রের প্রবাহ নক্সা দেওয়া হল।

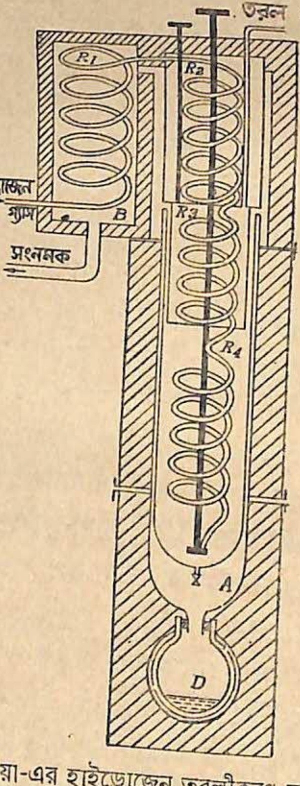
প্রথমে সংনমকের সাহায্যে বায়ুকে 40 বায়ুচাপে সংনমিত করা হয়। অতঃপর ঐ বায়ু I নং বিপরীত প্রবাহবাহী তাপবিনিময় কারক এর (Counter current heat exchanger) মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হয়। সেখানে তার তাপ-মাত্রা প্রসারিত ও বহির্গামী শীতল গ্যাসের দ্বারা প্রায় -80° সেণ্টিগ্রেডে নেমে যায়। তারপর, *A*-তে এসে ঐ গ্যাসটি দুভাগে ভাগ হয়ে যায়। প্রথম অংশ প্রসারণ ইঞ্জিন *B*-র মধ্যে যায়। এখানে প্রশীতল গ্যাসটি ইঞ্জিনের পিষ্টন ঠেলে কাজ করে এবং সেইসঙ্গে নিজে 1 বায়ুচাপ পর্যন্ত চাপে প্রসারিত হয়। তারফলে, এর তাপমাত্রা সংকট তাপমাত্রার নীচে নেমে যায়। তারপর, ঐ শীতল গ্যাসটি বহির্গমনকালে II নং তাপবিনিময় কারক এর মধ্যে অন্তঃগামী গ্যাসের প্রথম অংশের তাপমাত্রাকে সংকট তাপমাত্রারও নীচে নামায় এবং 1 নং তাপবিনিময়কারকের মধ্যে সমগ্র গ্যাসটিকে শীতল করে। এর ফলে নিজে শীতলতা হারিয়ে ঐটি সংনমকে ফিরে যায়। উচ্চ চাপযুক্ত গ্যাসের প্রথম অংশ যার তাপমাত্রা সংকট তাপমাত্রার নীচে নেমে এসেছিল, থ্রটল কপাটে এসে জুল-টমসন প্রসারণ লাভ করে। ফলে ঐটির চাপ 1 বায়ুচাপের সমান হয় এবং ঐটি আংশিকভাবে তরলায়িত হয়। বাকি অংশ যা কিনা তরলে পরিণত হল না, III নং, II নং ও I নং তাপবিনিময়কারকের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হয়ে অন্তঃমুখী গ্যাসকে শীতল করে এবং নিজে শীতলতা হারিয়ে পুনরায় সংনমকে ফিরে আসে, এই যন্ত্রে প্রসারণ ইঞ্জিন *B*-তে সিলিণ্ডারটিকে তাপনিরুদ্ধ (heat-insulated) করা হয় এবং পিষ্টনটিকে গ্যাস-নিশ্ছিদ্র (gas-tight) করা হয়। বলাই বাহুল্য, তাপবিনিময়কারকগুলি, থ্রটল কপাট ও তরল আধার, এ সবই যথোপযুক্ত তাপনিরুদ্ধ করতে হবে।

হাইল্যাণ্ড (Heylandt) এর অনুসৃত ক্লডের পদ্ধতিটি কিছুটা ভিন্ন ধরণের। এই ক্লড-হাইল্যাণ্ড পদ্ধতিতে বায়ুকে প্রথমে 200 বায়ুচাপে সংনমিত করা হয়, এবং তার একটি অংশকে সরাসরি প্রসারণ ইঞ্জিনের মধ্যে পাঠান হয়, এখানে ক্লডের মূল যন্ত্রের মত I নং তাপবিনিময়কারকটিকে রাখা হয় না। ইঞ্জিনে প্রসারণের পর ঐ প্রসারিত শীতল গ্যাসটিকে এক একটি তাপবিনিময়কারকের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত করান হয়। তার ফলে গ্যাসটির উচ্চচাপযুক্ত বাকী অংশ, যা প্রসারণ ইঞ্জিনে যায় নি, প্রসারিত শীতল গ্যাসের সংস্পর্শে এসে শীতল

হয়। তারপর, ঐ উচ্চচাপযুক্ত শীতল গ্যাসটিকে একটি জুল-টমসন প্রসারণ কপাটে প্রসারিত হতে দেওয়া হয়, যেখানে সেটি আংশিকভাবে তরলায়িত হয়। হাইল্যাণ্ডের যন্ত্রে প্রসারণ ইঞ্জিন থেকে যে বায়ু প্রসারিত হয়ে বের হয়ে এল, তার তাপমাত্রা সংকট তাপমাত্রার উপরে থাকে এবং অন্তঃগামী গ্যাসটিকে পুনঃসম্ভূত জুল-টমসন প্রক্রিয়ার সাহায্যে আরও শীতল করার ব্যবস্থা হয়।

ডেওয়ারের পদ্ধতিতে হাইড্রোজেন গ্যাসের তরলীকরণ

বিশুদ্ধ কাসকেড্ (Cascade) বা অবরোহণ পদ্ধতিতে গ্যাসকে তরলায়িত করার কৌশল হাইড্রোজেন গ্যাসের ক্ষেত্রে খাটল না। কারণ হল,



১০নং চিত্র—ডেওয়া-এর হাইড্রোজেন তরলীকরণ যন্ত্রের নক্সা।

হাইড্রোজেন গ্যাসের সংকট তাপমাত্রা কম, মাত্র $-240°$ সেণ্টিগ্রেড। আবার এই গ্যাসের বয়েল তাপমাত্রা হল $-177°$ সেণ্টিগ্রেড এবং উৎক্রম তাপমাত্রা

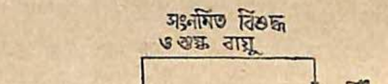
(Inversion Temperature) হল $-80°$ সেণ্টিগ্রেড। কাজেই, হাইড্রোজেন গ্যাসকে তরলায়িত করতে গেলে তাকে পূর্বেই উচ্চচাপে সংনমিত এবং শীতল করতে হবে। সেজন্য প্রথমে 150 বায়ুচাপে ঐ গ্যাসকে সংনমিত করে তারপর কম চাপে বাষ্পায়মান তরল বায়ুর সাহায্যে হাইড্রোজেন গ্যাসকে $-200°$ সেণ্টিগ্রেড তাপমাত্রায় শীতল করা হয়। ডেওয়ারের যন্ত্রের নকসা পূর্ব পৃষ্ঠায় দেওয়া হয়েছে।

জিঙ্ক ও সালফিউরিক এ্যাসিডের সাহায্যে হাইড্রোজেন গ্যাস প্রস্তুত করে তাকে 150 বায়ুচাপে সংনমিত করা হয়। তারপর তাকে শীতল জলের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত করে তার সংনমনজনিত উষ্ণতা দূর করা হয়। এরপর কষ্টিক-পটাস ইত্যাদি পূর্ণ স্তম্ভের মধ্য দিয়ে চালনা করে শুষ্ক এবং কার্বন ডাই অক্সাইড মুক্ত করা হয়। এরপর গ্যাসটি তরলকের মধ্যে প্রবেশ করে এবং পুনঃ সম্ভূত কুণ্ডলী (Regenerative coil) R_1 এর মধ্যে প্রবাহিত হয়। এর ফলে বহির্মুখী শীতল হাইড্রোজেন গ্যাসের সাহায্যে এটি ঠাণ্ডা হয় এবং এর তাপমাত্রা $-170°$ সেণ্টিগ্রেডে নেমে যায়। তারপর গ্যাসটি R_2 হিমাঙ্ক কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হয়। ঐ কুণ্ডলীটিকে তরল বায়ুর দ্বারা ঠাণ্ডা করা হয়। ঐখান থেকে হাইড্রোজেন গ্যাস R_3 কুণ্ডলীতে প্রবেশ করে। R_3-কে আবার 100 মিমি বায়ুচাপে বাষ্পায়মান তরল বায়ুর সাহায্যে শীতল করা হয়। এজন্য এরূপ ব্যবস্থা করা হয় যাতে A থেকে B প্রকোষ্ঠে তরল বায়ু চুঁইয়ে পড়ে এবং পাম্প P-র সাহায্যে B প্রকোষ্ঠের চাপ কমে যায়। এই ব্যবস্থার ফলে R_3 কুণ্ডলীতে হাইড্রোজেন গ্যাসের তাপমাত্রা কমে $-200°$ সেণ্টিগ্রেড হয়। এরপর ঐ গ্যাস R_4 পুনঃ সম্ভূত কুণ্ডলী দিয়ে প্রবাহিত হয়ে এসে A কপাটে জুল-টমসন প্রসারণ লাভ করে। ঐ প্রসারিত শীতল গ্যাসটি উপরে উঠতে থাকে এবং R_3 ও R_2 কুণ্ডলীর মধ্যস্থিত গ্যাসকে আরও শীতল করে এবং অবশেষে B কক্ষে প্রবেশ করে এবং সবশেষে সংনমকে ফিরে যায়। এইরূপে কয়েকবার এই প্রক্রিয়াটি চলার ফলে A-তে গ্যাসটির তাপমাত্রা $-250°$ সেণ্টিগ্রেড হয় এবং অবশেষে জুল-টমসন প্রসারণ লাভ করে এটি আংশিকভাবে তরলায়িত হয়ে D পাত্রে জমা হয়।

হ্যামসনের তরলীকরণ যন্ত্র

হ্যামসন গ্যাসকে তরল করার জন্য এক প্রকার যন্ত্র তৈরী করেছিলেন যার বৈশিষ্ট্য ছিল একটি বিশেষ ধরণের তাপ বিনিময়ী কুণ্ডলী যাকে বলা হয়

হ্যামসনের কুণ্ডলী। উচ্চচাপে সংনমিত হয়ে গ্যাসটি প্রথমে জিলাপির মত স্তরে স্তরে পাকিয়ে জড়ান সমাক্ষ (helical) কুণ্ডলীর আকারে তৈরী তামার নলের মধ্যে ঢোকে। তারপর গ্যাসটির থ্রটল প্রসারণ ঘটে এবং গ্যাসটি ঠাণ্ডা হয়। এই শীতল গ্যাস আবার কুণ্ডলীর স্তরগুলির মধ্যবর্তী অংশে যে ফাঁকা জায়গা থাকে সেখান দিয়ে উপরে ওঠার সময় আগত উচ্চচাপের গ্যাসকে শীতল করে। এইভাবে কিছু সময় পরে উচ্চচাপযুক্ত গ্যাসটি খুবই ঠাণ্ডা হয়, যার ফলে থ্রটল প্রসারণের পর গ্যাসটি তরলায়িত হয়। এই যন্ত্রে যেভাবে আগত গ্যাসকে শীতল করা হয় তা লিণ্ডের যন্ত্রে ব্যবহৃত পদ্ধতি থেকে পৃথক, এই যন্ত্রের কৌশল পরে ডেওয়ার, ওনেস্ ও মাইস্নার ব্যবহার করেন। নীচে যন্ত্রটির প্রবাহনক্সা দেওয়া হল।

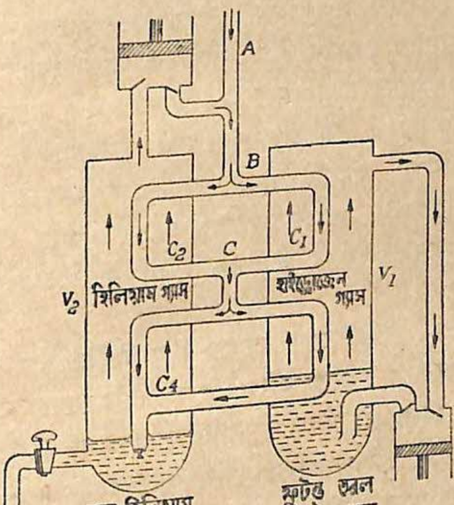


১১নং চিত্র—হ্যামসনের তরলীকরণ যন্ত্রের প্রবাহ নক্সা।

হ্যামসনের যন্ত্রের বৈশিষ্ট্য হল তাপবিনিময়কারক অংশ। জিলাপির মত (Helical Spiral) কুণ্ডলীর ভিতরের দিকে নলের মধ্য দিয়ে উচ্চচাপে যে গ্যাসটি নীচের দিকে প্রবাহিত হচ্ছে, সেই গ্যাসটি থ্রটল প্রসারণের পর শীতল হয়ে বাইরের দিকের নল দিয়ে ওপরে উঠছে। এই দুই বিপরীতমুখী গ্যাস প্রবাহের মধ্যে উষ্ণতার পার্থক্য থাকায় পরস্পরের মধ্যে তাপের আদানপ্রদান ঘটছে। এর ফলে, নীচের দিকে প্রবাহমান উচ্চচাপযুক্ত গ্যাসটি ক্রমশঃ শীতল হতে থাকে এবং অবশেষে থ্রটল প্রসারণের পর তরলে পরিণত হয়।

কামেরলিঙ্ ওনেসের হিলিয়াম তরলীকরণের পদ্ধতি

বিজ্ঞানীরা ইতিমধ্যে প্রায় সব গ্যাসকেই তরলায়িত করতে সমর্থ হলেন, কিন্তু শুধু হিলিয়াম গ্যাসই বাকী রইল। হিলিয়ামকে তরল করতে গিয়ে অনেকেই ব্যর্থ হলেন। অবশেষে বিজ্ঞানী কামেরলিঙ্ ওনেস্ লক্ষ্য করলেন যে, হিলিয়াম গ্যাসের বয়েল তাপমাত্রা হল 17° কেলভিন এবং উৎক্রম তাপমাত্রা হল 35° কেলভিন। যেহেতু এই দুটিই অত্যন্ত নীচে, হিলিয়াম গ্যাসকে অন্তঃতপক্ষে 15° কেলভিন তাপমাত্রায় শীতল না করে নিলে তাকে থ্রটল প্রসারণ দ্বারা তরলায়িত করা অসম্ভব। সেইজন্য কমচাপে বাষ্পীয়মান হাইড্রোজেনকে ব্যবহার করতে হবে, কারণ হাইড্রোজেনের স্বাভাবিক স্ফুটনাংক হল 20° কেলভিন। **ওনেস্** এইভাবে হিলিয়ামকে তরল করতে গিয়ে সফল হন। এখানে তাঁর ব্যবহৃত যন্ত্রের নক্সা ও কার্য্যপদ্ধতি আলোচনা করা হচ্ছে।



১২নং চিত্র—কামেরলিঙ্ ওনেসের তরলীকরণ যন্ত্রের প্রবাহনক্সা।

কামেরলিঙ্ ওনেস্ যে যন্ত্রটি লিডেনএ (Leiden) ব্যবহার করেছিলেন তার নক্সা চিত্রে দেখান হয়েছে। বিশুদ্ধ হিলিয়াম গ্যাসকে 26 বায়ুচাপে সংনমিত করে AB নল দিয়ে নীচের দিকে পাঠান হয়। B তে এসে গ্যাসটি দুইভাগে ভাগ হয়ে যায় এবং V_1 ও V_2 পাত্রের মধ্যে রক্ষিত C_1 ও C_2

তাপবিনিময়ী কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হয়। V_1 পাত্রের মধ্যে কমচাপে বাষ্পায়মান তরল হাইড্রোজেনের বাষ্প উঠছে, এই বাষ্পের দ্বারা C_1 কুণ্ডলীটি ঠাণ্ডা হচ্ছে। আবার, V_2 পাত্রের মধ্যে শীতল হিলিয়াম গ্যাসের বাষ্প উঠছে, যে হিলিয়াম গ্যাসটি E মুখে গিয়ে থ্রটল প্রসারণের ফলে শীতল হয়েছে। এই শীতল হিলিয়াম বাষ্পের দ্বারা C_2 কুণ্ডলীটি ঠাণ্ডা হয়। এখন C_1 ও C_2 কুণ্ডলীর মধ্যে হিলিয়াম গ্যাসের দুটি প্রবাহ কিছুটা শীতল হয়। তারপর আবার C তে গিয়ে ঐ দুটি প্রবাহ মিশে যায়, কিন্তু অতঃপর আবার তা দ্বিধাবিভক্ত হয় এবং C_3 ও C_4 এর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হয়। C_3 ও C_4 এর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হিলিয়াম গ্যাস আবার পূর্বের মত শীতল হাইড্রোজেন গ্যাসের বাষ্প ও শীতল হিলিয়াম গ্যাসের ঊর্দ্ধপ্রবাহ দ্বারা আরও ঠাণ্ডা হয়। এরপর, ঐ দুটি প্রবাহ আবার E তে এসে একত্রিত হয় এবং সেখানে থ্রটল প্রসারণ লাভ করে। থ্রটল প্রসারণের ফলে ঐ হিলিয়াম গ্যাস শীতল হয়ে V_2 পাত্রের মধ্য দিয়ে উপরে উঠতে থাকে। অবশেষে, ঐটি P_1 পাম্পে পৌঁছায়। সেখানে ঐটি সংনমিত হয়ে পুনরায় C_1 ও C_2র মধ্য দিয়ে ঠিক পূর্বের ন্যায় নেমে আসতে থাকে এবং অবশেষে E তে এসে থ্রটল প্রসারণ লাভ করে। এইভাবে পুনঃ পুনঃ সংনমিত ও থ্রটল প্রসারিত হবার ফলে হিলিয়াম গ্যাসটি খুবই শীতল হয়ে অবশেষে তরলে পরিণত হয়। ঐটি তারপর V_2 পাত্রের তলদেশে জমা হয় এবং ষ্টপকক্ S খুলে তাকে বের করে নেওয়া হয়। ঐ তরল হিলিয়ামের স্বাভাবিক স্ফুটনাংক হল 4·2° কেলভিন।

কামেরলিঙ্ ওনেস্ চাপ কমিয়ে দিয়ে হিলিয়ামকে কঠিনে পরিণত করতে চেষ্টা করেন। এতে যদিও তরল হিলিয়ামের তাপমাত্রা 1·15° কেলভিন পর্যন্ত নেমেছিল, কিন্তু তবুও হিলিয়াম জমাট বাঁধল না। এমনকি ১৯২১ সালে তিনি হিলিয়ামের বাষ্পচাপ ·013 মিমি এ নামিয়ে আনলেন, ফলে যদিও তাপমাত্রা ·82° কেলভিনে নেমে গেল, কিন্তু হিলিয়াম তরলই রইল। ওনেসের মৃত্যুর পর তাঁর উত্তরসূরী কীজম্ প্রচণ্ড চাপ প্রয়োগ করে হিলিয়ামকে কঠিনে পরিণত করতে সমর্থ হন। একটি সরু নলের মধ্যে 130 বায়ুচাপে হিলিয়ামকে সংনমিত করা হয় এবং সেটিকে আবার তরল হিলিয়ামের কুণ্ডে ডোবান হয়, দেখা গেল যে নলটি আটকে গিয়েছে। এর দ্বারা বোঝা গেল যে হিলিয়াম কঠিনে পরিণত হয়েছে। এটাও দেখা গেল যে, তাপমাত্রা যত নীচে হবে, হিলিয়ামকে জমাট বাঁধাতে চাপও তত কম লাগবে।

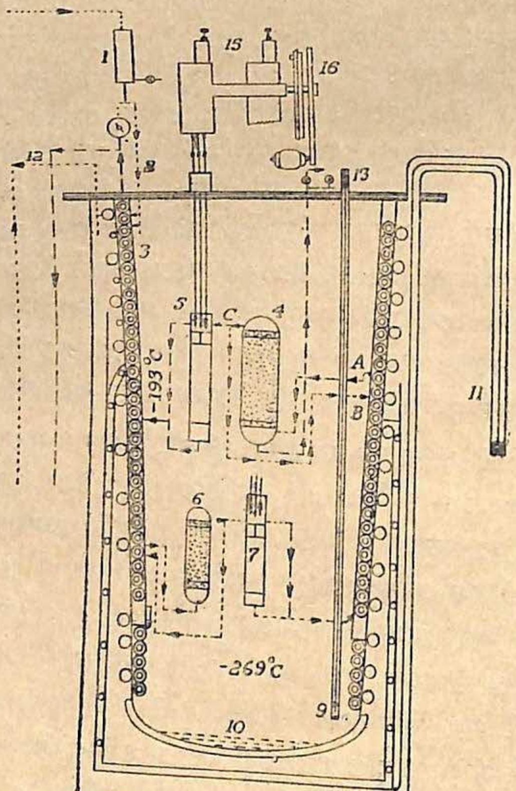
কলিন্সের হিলিয়াম তরলীকরণ যন্ত্র

ক্লড-হাইল্যাণ্ড পদ্ধতি অবলম্বন করে বায়ু তরলায়িত করা গেলেও হাইড্রোজেন বা হিলিয়াম গ্যাসকে তরল করতে এই পদ্ধতি অসুবিধার সম্মুখীন হল। কারণ, মসৃণকারক পদার্থগুলি (lubricants) তরল হাইড্রোজেন বা হিলিয়াম-এর তাপমাত্রায় জমে শক্ত হয়ে যায়। কিন্তু কাপিৎসা (Kapitza) এবং কলিন্স (Collins) খুব সুন্দরভাবে এই সমস্যা সমাধান করলেন। তাঁরা ঐরূপ পদার্থ একেবারেই ব্যবহার করলেন না। তার পরিবর্তে কাপিৎসার ইঞ্জিনে সিলিণ্ডারের মধ্যে পিষ্টনটিকে কিছুটা ঢিলেভাবে আটকান হল। এর ফলে উচ্চচাপে গ্যাসকে সিলিণ্ডারে প্রবেশ করানর সময় তা সিলিণ্ডার ও পিষ্টনের মধ্যবর্তী ফাঁক দিয়ে সহজেই গলে যেতে পারত। কিন্তু প্রসারণ ঘাতের সময় (expanding stroke) পিষ্টনটির খুব দ্রুত গতির জন্য সমগ্র প্রসারণকার্যটি এত অল্প সময়ের মধ্যে হত যে, পিষ্টন ও সিলিণ্ডারের মধ্যবর্তী ফাঁক দিয়ে খুব সামান্য পরিমাণ গ্যাসই গলে বের হয়ে যেতে সমর্থ হত। এই তাপনিরুদ্ধ প্রসারণের ফলে যে শীতল গ্যাসটি পাওয়া গেল তা, ক্লডের বায়ু তরলীকরণ যন্ত্রের অনুসৃত পদ্ধতির মত, উচ্চচাপযুক্ত যে গ্যাসটি ভিতরে প্রবেশ করছে তাকে শীতল করল। অবশেষে, গ্যাসটি খুব শীতল হলে তাকে জুল-টমসন প্রক্রিয়ার সাহায্যে তরলে পরিণত করা হল।

এই পদ্ধতির সুবিধা এই যে এতে পূর্ব-শীতলীকরণ (pre-cooling) এর প্রয়োজন হচ্ছে না। কলিন্স এই পদ্ধতিকে আরও উন্নত করেন। তিনি একটি শক্ত সংকর ধাতুর (Nitrided Nitralloy) তৈরী পিষ্টন এবং সিলিণ্ডার ব্যবহার করে পিষ্টন ও সিলিণ্ডারের মধ্যবর্তী ফাঁককে আরও কমিয়ে আনলেন। ফলে ঐ ফাঁক দিয়ে গ্যাসের গলে যাওয়ার পরিমাণও হ্রাস পেল এবং তাপ-নিরুদ্ধ প্রসারণের উৎকর্ষতা প্রায় 80% এ গিয়ে পৌঁছাল। এ ছাড়া বিশেষ ধরণের একটি তাপ বিনিময়কারক (heat exchange) ব্যবহার করে কলিন্স তার যন্ত্রের উৎকর্ষতা এত বৃদ্ধি করলেন যে, সহজে ও নিরাপদে তরল হিলিয়াম তৈরী করার জন্য এই যন্ত্রের প্রচুর বাণিজ্যিক চাহিদা হল। পরপৃষ্ঠায় কলিন্সের যন্ত্রের প্রবাহ নক্সা দেওয়া হল।

হিলিয়াম গ্যাসকে প্রথমে 15 বায়ুচাপে সংনমিত করা হয়। অতঃপর ঐ সংনমিত হিলিয়াম গ্যাসকে শীতল জল দ্বারা ঠাণ্ডা করা হয়। তারপর ঐটি প্রথমে একটি তৈল-বিভেদকের (oil-seperator) এবং পরে সূক্ষ্ম কাঁচ উল ফিল্টার (glass wool filter) এর মধ্য দিয়ে যায়। অবশেষে হিলিয়াম

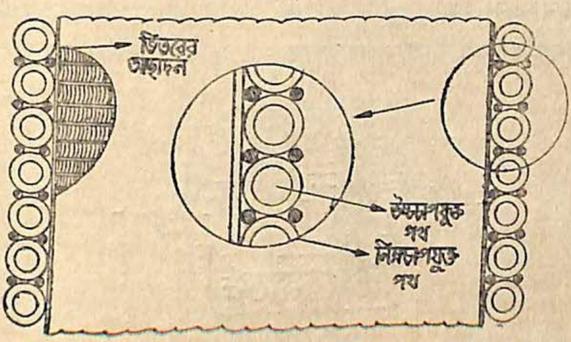
গ্যাসটি 2 নং পথ দিয়ে তরলকের মধ্যে প্রবেশ করে এবং বিশেষভাবে নির্মিত তাপ বিনিময়কারকের (3) মধ্য দিয়ে গমন করে। এটি তামা ও নিকেলের একটি সংকর ধাতুর তৈরী নল দ্বারা গঠিত, নলটির গায়ে একটি লম্বা তামার পাতলা পাত চক্রাকারে ঘুরিয়ে ঘুরিয়ে ঝালাই করে লাগান হয়। এই চক্রাকৃতি পাখনার (fin) মত পথে হিলিয়াম-প্রবাহ তাপ বিনিময়কারকের কাজ চালিয়ে যেতে পারে। গোটা নলটিকে আবার জিলিপির মত পাকে পাকে জড়িয়ে সমাক্ষ কুণ্ডলী (Helical spiral) করে স্টেইনলেস্টীলের (stainless steel)



১৩নং চিত্র—কলিন্সের তরলীকরণ যন্ত্রের প্রবাহ নক্সা।

একটি শঙ্কু আকৃতির নলের মধ্যে ঢুকিয়ে দেওয়া হয় এবং আবার এই সমগ্র অংশকে একটি বৃহৎ নলের মধ্যে প্রবিষ্ট করান হয়। ঐ নলের মধ্যবর্তী ফাঁক দিয়ে কমচাপযুক্ত হিলিয়ামগ্যাস ফিরে যেতে পারে, উচ্চচাপে সংনমিত

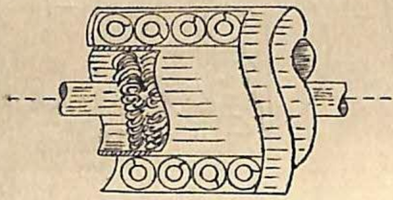
হিলিয়াম গ্যাস ঐ পাখনাযুক্ত নলের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হবার সময়, যে কমচাপযুক্ত হিলিয়াম গ্যাস বাইরের নলের ফাঁকা জায়গা দিয়ে বিপরীত মুখে ফিরে যাচ্ছে, তার দ্বারা শীতল হয়। অবশেষে Bতে এসে ঐটির তাপমাত্রা $-150°$ সেণ্টিগ্রেডে নেমে যায়। নীচে কলিন্সের তাপ বিনিময়কারকের প্রস্থচ্ছেদের চিত্র বড় করে দেখান হল।



১৪নং চিত্র কলিন্সের তাপ বিনিময়কারক।

অতঃপর ঐ গ্যাসটি পাত্র (4)-এ রাখা সক্রিয় (activated) নারিকেলের অঙ্গারচূর্ণের মধ্য দিয়ে যায়। তার ফলে গ্যাসটি সম্পূর্ণরূপে বিশুদ্ধ হয়। এরপর প্রথম প্রসারণ ইঞ্জিনে (5) ঐ হিলিয়াম গ্যাসের $\frac{1}{5}$ অংশ সমএনট্রপীয়ভাবে প্রসারিত হয় এবং তার তাপমাত্রা $-193°$ সেণ্টিগ্রেডে নেমে যায়। বাকী $\frac{4}{5}$ অংশ গ্যাস Bতে তাপ বিনিময়কারকগুলির মধ্যে প্রবেশ করে প্রবাহিত হতে থাকে, যাতে তার তাপমাত্রা $-25°$ সেণ্টিগ্রেডে নেমে যায়। তারপর ঐটি দ্বিতীয় অঙ্গারচূর্ণযুক্ত পাত্র (6) এর মধ্য দিয়ে যায় এবং C-তে এসে দুইভাগে বিভক্ত হয়। গ্যাসটির প্রায় $\frac{3}{5}$ অংশ দ্বিতীয় প্রসারণ ইঞ্জিন (7)-এ এসে সমএনট্রপীয় প্রসারণ লাভ করে এবং তার তাপমাত্রা $-26°$ সেণ্টিগ্রেডে নেমে যায়। ঐটি তারপর D-এ তাপ বিনিময়কারকগুলির মধ্যে প্রবেশ করে যাতে কিনা ঐখানে নিম্নচাপযুক্ত হিলিয়ামের সাথে ঐটি মিলিত হতে পারে। বাকী $\frac{2}{5}$ অংশ উচ্চচাপযুক্ত গ্যাসটি G-তে এসে তাপ বিনিময়-কারকগুলির মধ্যে প্রবাহিত হয়ে জুল-টমসন তাপ বিনিময়কারক (8)-এ প্রবেশ করে। শেষোক্ত তাপ বিনিময়কারকটির মধ্যে দুইটি সমকেন্দ্রিক নল পাকে পাকে জড়ান আছে, যার মধ্যবর্তী ফাঁক দিয়ে উচ্চচাপযুক্ত হিলিয়াম গ্যাসটি প্রবাহিত হতে পারে। অবশেষে ঐ গ্যাসটি জুল-টমসন প্রসারণ কপাট (9)-এ এসে প্রসারিত হয়। গ্যাসটির প্রায় $\frac{1}{10}$ অংশ তরলায়িত হয় এবং পাত্র

(10)-এ জমা হয়, ঐখান থেকে নল দিয়ে তাকে বের করে নেওয়া হয়। গ্যাসটির বাকী $\frac{9}{10}$ অংশ, যা কিনা তরলায়িত হল না, তাপ বিনিময়কারকের নিম্নচাপ অংশের দিকে প্রবেশ করে প্রসারণ ইঞ্জিন থেকে নির্গত গ্যাসের সাথে মিলিত হয় এবং (12)র মধ্য দিয়ে সংনমক এ পুনঃ প্রবেশ করে আবার পূর্বের ন্যায় সংনমিত হয়। হিলিয়ামের তরলায়নের (liquefaction) পরিমাণ বৃদ্ধি করার জন্য এবং সময় কিছুটা কমিয়ে আনার জন্য তরল নাইট্রোজেন এর সাহায্যে কখনও কখনও প্রারম্ভে গ্যাসটিকে শীতল করে নেওয়া হয়।



১৫নং চিত্র—কলিন্সের তাপ বিনিময়কারকের সমাহারচিত্র।

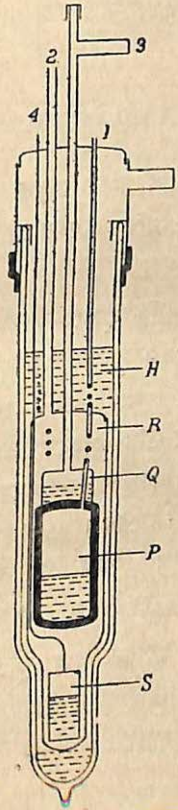
কলিন্সের যন্ত্রে ব্যবহৃত তাপ বিনিময়কারক এর সমাহার চিত্র (Assembly design) ১৫ নং চিত্রে দেখান হয়েছে। এ ছাড়া আরও নানারূপ আকৃতির তাপ বিনিময়কারক অন্যান্য যন্ত্রে ব্যবহৃত হয়।

অন্যান্য ধরণের হিলিয়াম তরলীকরণের যন্ত্র

উচ্চচাপযুক্ত হিলিয়াম গ্যাসকে প্রথমে কঠিন হাইড্রোজেন দ্বারা শীতল করা হয় এবং অতঃপর ঐটিকে জুল-গেলুসাক (Joule Gay Lussac) প্রসারণ পদ্ধতিতে মুক্ত প্রসারিত হতে দেওয়া হয়। এর ফলে, হিলিয়াম তরলে পরিণত হয়। সচরাচর পরীক্ষাগারে অল্প পরিমাণ তরল হিলিয়াম তৈরী করতে এই প্রণালী ব্যবহৃত হয়। এরূপ যন্ত্রের নাম রাখা হয়েছে সাইমন প্রসারণ বম্ব (Simon expansion bomb)। পরপৃষ্ঠায় যন্ত্রটির ছবি দেওয়া হল।

1 নং নলের মধ্য দিয়ে হিলিয়ামকে সংনমিত করা হয় এবং প্রায় 150 বায়ুচাপে Pতে পাঠান হয়। Pকে বাহিরের H পাত্রে রাখা তরল হাইড্রোজেন গ্যাসের সাহায্যে শীতল করা হয়, এই তাপ পরিবহনের সুবিধার জন্য Rতে কম চাপে হিলিয়াম গ্যাস রাখা হয়েছে। আবার, 3 নং নল দিয়ে ভিতরের Q পাত্রেও তরল হাইড্রোজেন রাখা হয়। এরপর পাম্প করে Rর মধ্যস্থ হিলিয়াম গ্যাস বের করে দেওয়া হয় এবং Qর ভিতরের তরল হাইড্রোজেনকে শোষক

পাম্পের সাহায্যে পাম্প করা হয়, ফলে ঐ তরল হাইড্রোজেন জমে যায় এবং তার তাপমাত্রা হয় 11° কেলভিন। এখন Pর মধ্যে রাখা সংনমিত হিলিয়াম গ্যাসের চাপ ধীরে ধীরে কমিয়ে 1 বায়ুচাপ করা হয় এবং ঐটি তাপরুদ্ধ ভাবে হয়, কারণ Rতে হিলিয়াম গ্যাস বা অন্য কিছু না থাকায় তাপ চলাচল করতে পারে না। এর ফলে, Pর মধ্যস্থ হিলিয়াম গ্যাসের প্রায় অনেকটাই তরলে পরিণত হয়।



১৬ নং চিত্র—সাইমনের প্রসারণ যন্ত্র।

পরীক্ষা কার্য চালাবার জন্য 1 বায়ুচাপে হিলিয়াম গ্যাসকে 4 নং নল দিয়ে, যেটি Pর একপাশে জুড়ে দেওয়া হয়েছে, S পাত্রে পাঠান হয়। Pর মধ্যস্থ তরল হিলিয়ামের তাপমাত্রার সংস্পর্শের ফলে Sর মধ্যস্থ কম চাপে হিলিয়াম তরলায়িত হয়। Sর নীচেকার অংশে হিলিয়ামকে দেখার জন্য কাঁচের দ্বারা ঐ অংশ নির্মিত হয়।

বিশোষণ পদ্ধতিতে হিলিয়ামের তরলীকরণ

সাইমন হিলিয়ামকে তরলায়িত করার জন্য একটি চিত্তাকর্ষক পদ্ধতির কথা বলেছিলেন। কাঠকয়লা ফোপড়া (porous) বলে ঐটি হিলিয়াম গ্যাসকে শোষণ করে ধরে রাখতে পারে। এখন যদি, ঐরূপ কাঠকয়লায় ধরে রাখা হিলিয়াম গ্যাসকে 14° কেলভিন তাপমাত্রায় শীতল করা হয় এবং তারপর খুব দ্রুত পাম্প করা হয়, তাহলে ঐ হিলিয়াম গ্যাস তরলে পরিণত হয়। এই পদ্ধতির সাহায্যে হিলিয়ামকে তরলায়িত করা যায়।

ফিলিপস্-এর নাইট্রোজেন তরলীকরণ যন্ত্র

বর্তমানে ফিলিপস্ কোম্পানী কর্তৃক প্রস্তুত নাইট্রোজেন গ্যাসের তরলীকরণ যন্ত্রটি বাণিজ্যিকভাবে বহুল প্রচারিত হইয়াছে। এই যন্ত্রের কার্যের মূলতত্ত্ব এখানে সংক্ষেপে আলোচিত হইল।

ফিলিপস্-এর যন্ত্রের কার্যনীতি মূলতঃ কার্ক চক্রের (Kirk cycle) সদৃশ, যা কিনা ষ্টার্লিং কর্তৃক ১৮২৭ সালে আবিষ্কৃত তাপ-চক্রের (heat cycle) বিপরীত হিমায়ন প্রক্রিয়ার (reversed refrigeration) ঠিক অনুরূপ। কোহ্‌লার (Kohler) এবং তাঁর সহযোগীরা ১৯৫৪ সাল থেকে ১৯৬০ সালের মধ্যে ফিলিপস্ কোম্পানীর গবেষণাগারে উপরোক্ত চক্রকে কাজে লাগিয়ে একাধিক তরলীকরণ যন্ত্র তৈরী করেন। এর প্রথম প্রয়োগের ফলে একটি বায়ু তরলীকরণ যন্ত্র তৈরী হয়। পরে তার সাথে একটি অংশকারক স্তম্ভ (fractionating column) জুড়ে দিয়ে তরল নাইট্রোজেন তৈরী করা হয়।

ফিলিপস্ কোম্পানীর প্রসারণ যন্ত্রে দুটি পিষ্টনের মত অংশ আছে, যেগুলিকে অক্ষদণ্ডের (Crankshaft) সাহায্যে উপরে-নীচে গতিশীল করা হয়। তার ফলে ঐগুলিতে সরল হারমনিক গতির (Simple Larmonic moton) সৃষ্টি হয়। ১৭ নং চিত্রে যে নীচের পিষ্টনটি দেখা যাচ্ছে তার দ্বারা শুধু ঐ কার্য হয় এবং কার্য গৃহীত হয়। অপরপক্ষে, উপরের পিষ্টনটির সাহায্যে তন্ত্রটির একপ্রান্ত হইতে অপর প্রান্তে প্রায় স্থির চাপে গ্যাসটিকে ঠেলে দেওয়া হয়, এর ফলে খুবই সামান্য পরিমাণ কার্য করা হয় বা কার্য গৃহীত হয়। এইজন্য, উপরের পিষ্টনটিকে বলা হয় অপসারক (displacer)। এখন, নীচে কার্যচক্রটি বর্ণিত হল।

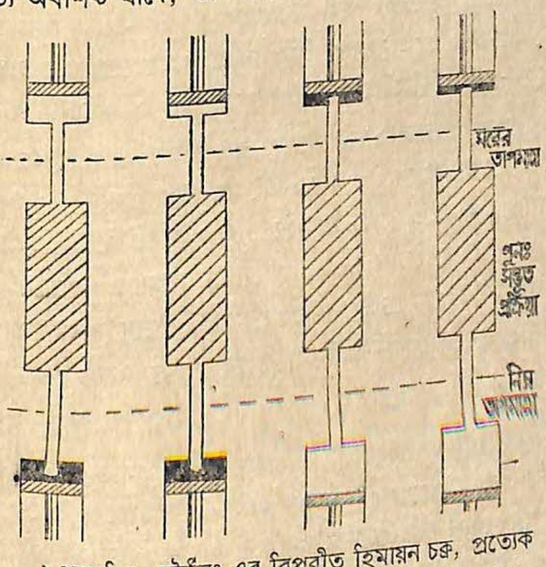
সংনমন—হাইড্রোজেন বা হিলিয়াম গ্যাসকে, যাকে নেওয়া হয়, প্রায় 45

বায়ুচাপে সংনমন কক্ষে সংনমিত করা হয়। এই সংনমনের ফলে যে তাপসৃষ্টি হয়, তা উচ্চ উষ্ণতা-তাপ বিনিময়কারকের (high temperature heat exchanger) মধ্যে প্রবাহিত শীতল জল দ্বারা দূর করা হয়।

তন্ত্রের উষ্ণ অংশ থেকে শীতল অংশে প্রেরণ—অতঃপর অপসারকটি নেমে আসে, ফলে গ্যাসটি সূক্ষ্ম ফস্‌ফর-ব্রোজ তারপূর্ণ পুনঃসম্ভূত কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে যায়। এখানে পূর্বের কার্যচক্রের জন্য যদি কোন শৈত্য সৃষ্টি হয়ে থাকে, তা গ্যাসটিতে সঞ্চারিত হয় এবং গ্যাসটি নিম্ন উষ্ণতা-তাপবিনিময়কারকের মাধ্যমে উচ্চে অবস্থিত প্রসারণকক্ষে যায়। ঐ তাপবিনিময়কারকটি সিলিণ্ডারশীর্ষে পাখনার আকারে লাগান থাকে।

প্রসারণ—পিষ্টনটি এবার নেমে আসে এবং প্রসারণের সময়, এটির উপর গ্যাসটি কার্য করে ও শীতল হয়। সেই সময়, অপসারকটি পিষ্টনটির সঙ্গে আরও নীচে নেমে আসে।

তন্ত্রটির শীতল অংশ থেকে উষ্ণ অংশে প্রেরণ—অপসারকটি অতঃপর তার শেষ সীমা পর্যন্ত ঠেলে ওঠে। তার ফলে ঐটি গ্যাসটিকে 20 বায়ুচাপে পুনঃসম্ভূত কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে প্রসারণ কক্ষে পাঠিয়ে দেয়। সেখানে ঐটির যতটুকু শৈত্য অবশিষ্ট থাকে, তা সঞ্চারিত হয়।



১৭নং চিত্র—ষ্টার্লিং এর বিপরীত হিমায়ন চক্র, প্রত্যেক ধাপে গতিশীল অংশের অবস্থান দেখান হয়েছে।

প্রসারণ কক্ষটির শীর্ষদেশ তাপকুণ্ডের (heat sink) মত আচরণ করে। এখানে বায়ু সাধারণ বায়ুচাপে ঘনীভূত হয়।

পুনঃসম্ভূত কুণ্ডলীটি চক্রাকার প্রক্রিয়ায় অবিরত বিপরীত প্রবাহ তাপ বিনিময় কারকের মত কাজ করে।

ফিলিপস্-এর যন্ত্রটির শীর্ষদেশে একটি অন্তরিত (insulated) তাপ বিনিময় কারক আছে, যেখানে বেশ কয়েক ঘণ্টা কাজ চলার ফলে জলীয় বাষ্প এবং কার্বনডাই অক্সাইড প্রভৃতি দূষিত পদার্থ (impurity) জমে যায়। কাজেই, যেটি আদৎ ঘনীভবন তল (condensing surface) সেটি প্রকৃতই পরিষ্কার থাকে।

বর্তমানে যেসব বৃহৎ নাইট্রোজেন তরলীকরণ যন্ত্র বাজারে চালু আছে, সেগুলিতে এই উল্লিখিত কার্যপ্রক্রিয়াকে সামান্য কিছু পরিবর্তন করে কার্যকারীতাকে উন্নততর করা হয়েছে।

হিলিয়ামকে কঠিনে পরিণত করার প্রচেষ্টা

হিলিয়াম গ্যাসকে তরলায়িত করে বিজ্ঞানীরা $4°K$ পর্যন্ত নিম্নতাপমাত্রা সৃষ্টি করতে পারলেন। কিন্তু তাতেই তাঁদের প্রচেষ্টা থেমে থাকল না। এরপর, বিজ্ঞানীদের প্রচেষ্টা হল কিভাবে $4°K$র নীচে তাপমাত্রা সৃষ্টি করা যায়। এই প্রচেষ্টার ফলেই দেখা দিল নিম্নতাপ জগতের সবচেয়ে চাঞ্চল্যকর আবিষ্কারসমূহ—তরল হিলিয়ামের দ্বিবিধ রূপ, তাদের বিচিত্র ব্যবহার ইত্যাদি।

কামেরলিঙ্ ওনেস্ ১৯১০ সালে চাপ কমিয়ে তরল হিলিয়ামকে কঠিনে পরিণত করতে চেষ্টা করেন। যদিও এই প্রচেষ্টায় তিনি $1{\cdot}15°$ কেলভিন পর্যন্ত তাপমাত্রা নামাতে পেরেছিলেন, কিন্তু তবুও তরল হিলিয়াম তরলই থেকে গেল। আবার, তিনি ১৯২১ সালে চাপ আরও কমিয়ে হিলিয়ামকে কঠিনে পরিণত করার চেষ্টা করলেন, যদিও তার ফলে তাপমাত্রা $\cdot82°$ কেলভিন পর্যন্ত নেমে গেল—যা কিনা তখন পর্যন্ত আর কেউ পারেন নি, তবুও 'তরলমতি' হিলিয়ামকে কঠিনে পরিণত করা গেল না। **ওনেস্** এর মৃত্যুর পর তাঁরই ছাত্র ও সহযোগী কীজম্ এবার অন্যভাবে চেষ্টা করলেন। তিনি একটি সরু পিতলের নলের মধ্যে হিলিয়ামকে রেখে তার উপর 130 বায়ুচাপের সমান চাপ প্রয়োগ করলেন, নলটিকে তরল হিলিয়ামের মধ্যে ডুবিয়ে রাখা হল। দেখা গেল যে, ঐ অংশের তরল হিলিয়াম কঠিনে পরিণত হয়েছে, চাপকে কিছুটা (1 বা 2 বায়ুচাপ) কমিয়ে দিলেই আবার কঠিন হিলিয়াম তরলে পরিণত হল।

তাপরুদ্ধ বিচুম্বকন প্রক্রিয়ার সাহায্যে শীতলীকরণ

কেমারলিঙ্ ওনেস্ তরল হিলিয়ামের সাহায্যে ·85° কেলভিন পর্যন্ত তাপমাত্রা নামাতে পেরেছিলেন, আর কীজম্ জমাট কঠিন হিলিয়ামের সাহায্যে ·79° কেলভিন পর্যন্ত তাপমাত্রায় পৌঁছতে পারেন। কিন্তু এর নীচে তাপমাত্রা নামান খুবই দুঃসাধ্য হয়ে দাঁড়াল এবং প্রায় অসম্ভব বলে মনে হতে লাগল। এদিকে, ডিবাই (Debye) তত্ত্বগত আলোচনা করে দেখালেন যে, তাপরুদ্ধ ভাবে প্যারাম্যাগনেটিক লবণের বিচুম্বকন প্রক্রিয়া করলে তার তাপমাত্রা পরমশূন্যের খুব কাছাকাছি পৌঁছতে পারে। কোন কোন প্যারাম্যাগনেটিক বস্তুর চুম্বকগ্রাহিতা তার পরমশূন্য তাপমাত্রার সাথে প্রায় ব্যস্ত অনুপাতী (Inversely proportional)—কুরীর এই সূত্রটিকে কাজে লাগিয়ে জোকে ও ম্যাকডুগ্যাল এমন এক ধরণের যন্ত্র তৈরী করলেন যাতে কোন প্যারাম্যাগনেটিক লবণকে, যথা গ্যাডোলিনিয়াম সালফেট, লোহা—এ্যালুমিনিয়াম সালফেট ইত্যাদিকে সমতাপ অবস্থায় চুম্বকন করা হয় এবং তাপরুদ্ধ ভাবে বিচুম্বকন করা হয়। তার ফলে, তাপমাত্রা পরমশূন্যের খুবই কাছে নেমে যায়। যন্ত্রটি ছবিতে দেখান হয়েছে। ডিম্বাকৃতি প্যারাম্যাগনেটিক লবণের পিণ্ড S কে নাইলন বা সিল্ক সূতার সাহায্যে কাঁচের নল Aর মধ্যে ঝুলিয়ে দেওয়া হয়। ঐ নলটি আবার হিলিয়াম গ্যাসের কুণ্ডের সাথে বা কোন পাম্পের সাথে ষ্টপককের সাহায্যে সংযুক্ত করা হয়। প্রথমে কাঁচনল A কে হিলিয়াম গ্যাস দিয়ে ভর্ত্তি করা হয়। তারপর A নলটিকে দুইটি সমাক্ষ ডেওয়ার ফ্লাস্ক D_1, D_2 দিয়ে পরপর ঘিরে রাখা হয়। D_1 ফ্লাস্কে আছে তরল হিলিয়াম, D_2 ফ্লাস্কে আছে তরল হাইড্রোজেন এবং তার বাইরে আছে তরল বায়ু। এই সকল অংশকে আবার একটি বিশাল তড়িৎচুম্বক NS এর মেরুদ্বয়ের মধ্যে রাখা হয়। ঐ তড়িৎচুম্বকের সাহায্যে প্রায় 20,000 থেকে 30,000 গস্ (Gauss) চৌম্বক ক্ষেত্র সৃষ্টি করা যায়। ফ্লাস্ক D_1 এ হিলিয়ামকে কম চাপে ফোটালে তার তাপমাত্রা এবং A নলের মধ্যস্থ প্যারাম্যাগনেটিক লবণের তাপমাত্রা 1° কেলভিন হয়। এরপর তড়িৎচুম্বকটিকে চালু করে প্যারাম্যাগনেটিক লবণ S কে চৌম্বক করা হয় তার চুম্বকানুগুলি অসজ্জিত (desordered) অবস্থা হতে সজ্জিত অবস্থায় আসে। এর ফলে যে উত্তাপ সৃষ্টি হয় তা লবণটিকে ঘিরে A ফ্লাস্কে রাখা তরল হিলিয়ামে প্রবাহিত হয়। এইভাবে সমতাপ (isothermal) অবস্থা বজায় থাকে। এরপর পাম্প করে A থেকে হিলিয়াম গ্যাসকে বের করে দেওয়া

হয়। তখন, সমগ্র অংশটিকে চাকার উপর দ্রুত চুম্বকক্ষেত্র হতে অপসারিত করা হয়। ফলে, আণবিক চুম্বকগুলি সজ্জিত অবস্থা হতে পুনরায় আগের অসজ্জিত অবস্থায় ফিরতে চেষ্টা করে। ফলে, তাদের কার্য করতে হয় এবং তার ফলে তারা শক্তি হারিয়ে খুবই শীতল হয়ে পড়ে। এই শীতল লবণের তাপমাত্রা মাপার জন্য কাঁচনল Aর চারদিকে একটি সমাক্ষ বিশিষ্ট (coaxial) তারকুণ্ডলী C আটকান হয়। তড়িৎকুণ্ডলীর সাথে সংযুক্ত এ.সি. ব্রিজ দ্বারা তড়িৎকুণ্ডলীর নিজ-আবেশ (self-inductance) পরিমাপ করা হয়, এখন, তড়িৎকুণ্ডলীর নিজ আবেশ প্যারাম্যাগনেটিক লবণের চুম্বক গ্রাহিতার (susceptibility) উপর বিশেষ করে নির্ভর করে। আবার, তড়িৎকুণ্ডলী Cর চুম্বকগ্রাহিতা জেনে তার তাপমাত্রা বের করা যায়। এই পদ্ধতি প্রয়োগ করে ডি হাস্ (de Haas) ১৯৪৪ সালে ·002° কেলভিন পর্যন্ত তাপমাত্রায় পৌঁছতে পেরেছিলেন। ডি-ক্লার্ক (de Klerk) ১৯৫১ সালে ·0014° কেলভিন পর্যন্ত তাপমাত্রা নামাতে পেরেছিলেন।

এই ঘটনার তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা খুব সংক্ষেপে এইভাবে দেওয়া যায়ঃ

কুরী-ল্যাঞ্জভার (Curie-Langevin) প্যারাম্যাগনেটিজম্ তত্ত্ব অনুযায়ী, কোন প্যারাম্যাগনেটিক কেলাসের অভ্যন্তরে অত্যন্ত ক্ষুদ্র পারমাণবিক চুম্বক থাকে। যেমন, ধরা যাক কোন $FeCl_2$ এর কেলাস এর অভ্যন্তরে Fe^{++} আয়ন থাকে, যেগুলি প্রত্যেকটি এক একটি অত্যন্ত ক্ষুদ্র পারমাণবিক চুম্বক এবং ঐগুলির দুইদিকে দুইটি Cl^- আয়ন থাকে, সেই Cl^- আয়নগুলি ডায়া ম্যাগনেটিক। এখন, এই অত্যন্ত ক্ষুদ্র Fe^{++} আয়নগুলি প্রত্যেকে এক একটি চুম্বক হওয়ায় ওদের চৌম্বক ভ্রামক (Magnetic moment) থাকে এবং কোন চৌম্বক ক্ষেত্র না থাকলে ঐগুলি কেলাসের মধ্যে অসজ্জিত অবস্থায় থাকে, কিন্তু কোন চৌম্বক ক্ষেত্র ওদের উপর প্রয়োগ করলে তারা চৌম্বক ক্ষেত্রের সমান্তরালভাবে সজ্জিত হতে চায়। তার ফলে প্রত্যেক একক আয়তনে একটি মোট (resaltant) চৌম্বক ভ্রামক I সৃষ্টি হয়। ল্যাঞ্জভা দেখিয়েছিলেন যে, চুম্বকগ্রাহিতা χ কে এভাবে প্রকাশ করা যায়,

$$\chi = \frac{I}{H} = \frac{1}{3}\,\frac{\mu^2 n}{KT} \qquad \text{(মোটামুটিভাবে)}$$

এখানে, H হচ্ছে চৌম্বক ক্ষেত্রের মান,

μ হচ্ছে প্রত্যেক প্যারাম্যাগনেটিক আয়নের চৌম্বক ভ্রামক

n হচ্ছে প্রত্যেক একক আয়তনে আয়নের সংখ্যা

T হচ্ছে পরম তাপমাত্রা

এবং K বোল্টজ্‌ম্যানের ধ্রুবক (Boltzman's constant)। ল্যাঞ্জভা সুন্দরভাবে পরীক্ষামূলকভাবে প্রাপ্ত কুরীর সূত্র (Curic law) $\chi = C/T$ (C হচ্ছে কুরীর ধ্রুবক) কে তত্ত্বগতভাবে ব্যাখ্যা করেন। কামেরলিঙ্‌ ওনেস্‌ $1{\cdot}3°$ K পর্যন্ত গ্যাডোলিনিয়াম সালফেট নিয়ে পরীক্ষা করে দেখলেন যে, কুরীর সূত্র মোটামুটিভাবে খাটে।

এখন, এটা বোঝা যাচ্ছে যে, কোন চৌম্বক ক্ষেত্রে কোন প্যারাম্যাগনেটিক কেলাস রাখলে তার তাপগতিবিদ্যা সংক্রান্ত আচরণ, চাপ p ও আয়তন v ছাড়াও চৌম্বক ক্ষেত্র Hর উপরও নির্ভর করে। সচরাচর ব্যবহৃত তাপগতিবিদ্যা সংক্রান্ত সম্পর্কটি হল $\delta Q = du + pdv$, এখানে δQ হচ্ছে তাপের বৃদ্ধি, du হচ্ছে অন্তর্শক্তির বৃদ্ধি এবং dv হচ্ছে আয়তনের বৃদ্ধি, p হচ্ছে চাপ। কিন্তু চৌম্বক ক্ষেত্র H প্রযুক্ত হলে এই সম্পর্কটি এইরূপে লেখা হবে,

$$\delta Q = du + pdv - HdI \qquad \dots (11)$$

এখানে I হচ্ছে প্রতি গ্রাম অণুতে চৌম্বকনের তীব্রতা (Intensity of magnetisation)। কাজেই, HdI হল বস্তুটিকে চৌম্বক করতে গিয়ে ক্ষেত্রটিকে যে পরিমাণ কাজ করতে হয়। তাপগতিবিদ্যা সংক্রান্ত আলোচনা করে দেখান যায় যে,

$$T_f - T_i = \frac{C}{C_H T}\int_{H_i}^{H_f} HdH \qquad \dots (12)$$

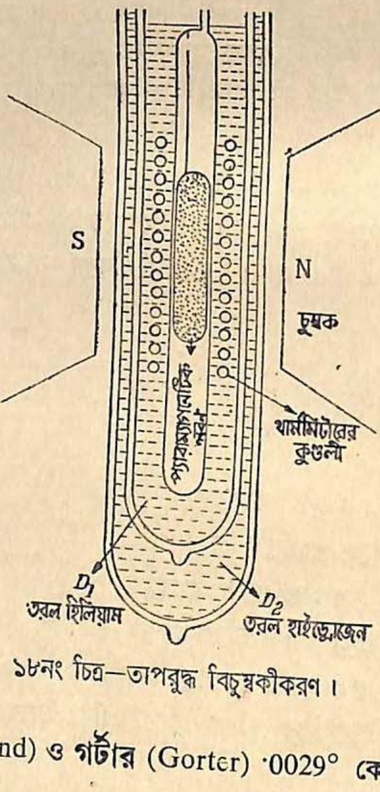
এখানে, T_f হল শেষ তাপমাত্রা
T_i হল প্রারম্ভিক তাপমাত্রা
H_f হল অন্ত চৌম্বক ক্ষেত্র
H_i হল আদি চৌম্বক ক্ষেত্র
C হল 'কুরীর ধ্রুবক' (Curies constant)
C_H হল স্থির চৌম্বক ক্ষেত্রে বস্তুটির উপর আপেক্ষিক তাপের গড়মান।

এখন, মনে করা যাক, $H_f = 0$ (অর্থাৎ বিচুম্বকন প্রক্রিয়া), তাহলে দেখান যায় যে,

$$-\Delta T = T_i - T_f = \frac{C}{2T_i C_H} H_i^2 \qquad \dots (13)$$

$-\Delta T$ হচ্ছে তাপমাত্রার হ্রাস।

অবশ্য, এটা হল একটি স্থূল হিসাব। **জোকে ও ম্যাকডুগাল** গ্যাডোলিনিয়াম সালফেট কেলাসের উপর এই পদ্ধতি প্রয়োগ করে এবং প্রারম্ভিক তাপমাত্রা 1·5° কেলভিন থেকে শুরু করে দেখলেন যে, তাপমাত্রা ·25° কেলভিন হ্রাস পেয়েছে। এরপর অনেকেই এই পদ্ধতি প্রয়োগ করেন। **ডিহাস্** ও ভিরস্‌মা (Wiersma) ক্রোমিয়াম পটাশিয়াম এ্যালাম ও এ্যালুমিনিয়াম পটাশিয়াম এ্যালামের মিশ্র কেলাস নিয়ে 1·29° কেলভিন তাপমাত্রা থেকে আরম্ভ করে ·0034° কেলভিন তাপমাত্রা পর্যন্ত পৌঁছতে পেরেছিলেন। এরপর কিন্তু



১৮নং চিত্র—তাপরুদ্ধ বিচুম্বকীকরণ।

ষ্টীনল্যাণ্ড (Steenland) ও **গর্টার** (Gorter) ·0029° কেলভিন পর্যন্ত তাপমাত্রায় পৌঁছেছিলেন।

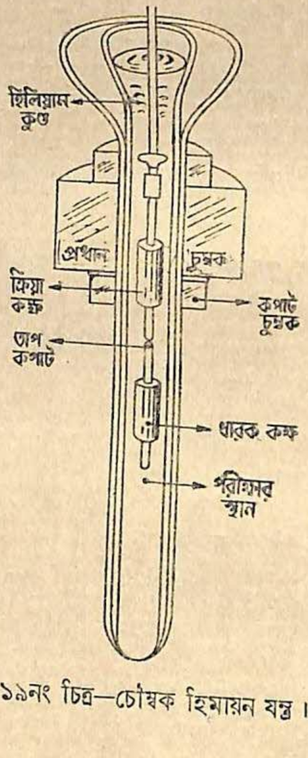
স্তম্ভলেখ ৪ঃ তাপরুদ্ধ বিচুম্বকন প্রক্রিয়ার পরীক্ষায় প্রাপ্ত কয়েকটি ফলাফল

পরীক্ষকের নাম	তারিখ	প্যারাম্যাগনেটিক লবণের নাম	আদি চৌম্বকক্ষেত্র Hi(Oe)	আদি তাপমাত্রা Ti (°K)	শেষ তাপমাত্রা Tf
জোকে ও ম্যাকডুগাল	1933	গ্যাডোলিনিয়াম সালফেট	8,000	1·5	0·25
ডিহাস্, ভিরস্মা ও ক্রামারস্	1933	সিরিয়াম ফ্লোরাইড	27,600	1·35	0·13
		ডিসপ্রোসিয়াম ইথাইল সালফেট	19,500	1·35	0·12
		সিরিয়াম ইথাইল সালফেট	27,603	1·35	0·085
ডিহাস ও ভিরস্মা	1934	ক্রোমিয়াম পটাসিয়াম এ্যালাম	24,600	1·16	0·031
ঐ	1935	আয়রন এ্যালুমিনিয়াম এ্যালাম	24,075	1·20	0·018
ঐ		মিশ্র এ্যালাম	24,075	1·29	0·0044
ঐ		সিজিয়াম টিটানিয়াম এ্যালাম	24,075	1·31	0·0055
কুর্টি ও সাইমন	1935	গ্যাডোলিনিয়াম সালফেট	5,400	1·15	0·35
ঐ		ম্যাঙ্গানীজ এ্যামোনিয়াম সালফেট	8,000	1·23	0·09
ঐ		আয়রন এ্যামোনিয়াম এ্যালাম	14,100	1·23	0·038
		ঐ	8,300	1·23	0·072
		ঐ	4,950	1·23	0·114

পরপৃষ্ঠায় একটি চৌম্বক হিমায়ন যন্ত্রের চিত্র ও কার্যপ্রণালী দেওয়া হল।

চৌম্বক হিমায়ন যন্ত্র

দান্ত (Daunt)ও **হিয়ার** (Hier) একপ্রকারের চৌম্বক হিমায়ন যন্ত্র উদ্ভাবন করেছিলেন, যাতে আয়রন-এ্যালুমিনিয়াম এ্যালামকে একটি তরল হিলিয়াম কুণ্ডের সংস্পর্শে রেখে চুম্বকন প্রক্রিয়া করা হয় এবং অপর একটি তরল হিলিয়াম কুণ্ডের সংস্পর্শে রেখে বিচুম্বকন করা হয়। প্রথম কুণ্ডটি উত্তাপ ধারক (Heat reservoir) এবং দ্বিতীয় বস্তুটি শৈত্য-ধারক (Cold reservoir) হিসাবে কাজ করে। নিম্নে যন্ত্রটির একটি নক্সা দেওয়া হয়েছে।



১৯নং চিত্র—চৌম্বক হিমায়ন যন্ত্র।

ছবিতে লক্ষ্য করা যেতে পারে যে, তাপ কপাট (Thermal valve) চিহ্নিত দুটি সরু ধাতব দণ্ড আছে, দণ্ড দুটি সীসা দ্বারা নির্মিত এবং ঐগুলি 'ক্রিয়াকক্ষে' (working cell) ন্যস্ত প্যারাম্যাগনেটিক লবণকে যথাক্রমে উপরের হিলিয়াম কুণ্ডের সাথে এবং নীচের 'ধারক কক্ষের' (reservoir cell) সাথে সংযুক্ত করে। 7·22° কেলভিন তাপমাত্রার নীচে সীসা অতি তড়িৎ পরিবাহী হয় এবং সেইসঙ্গে তাপের অত্যন্ত কুপরিবাহী হয়ে যায়। কিন্তু যদি মাত্র কয়েক শত

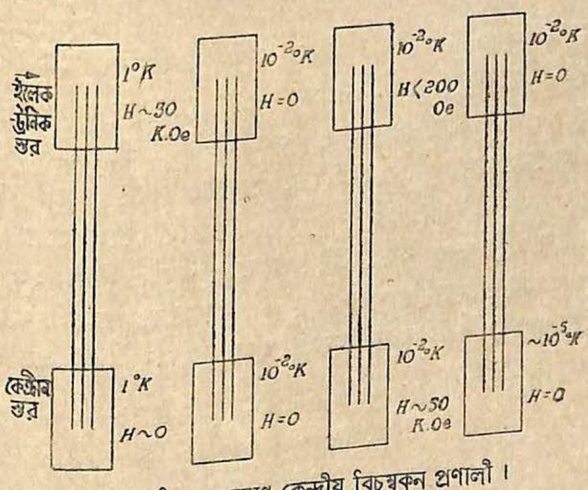
ওরস্টেড্ (Orested) চুম্বক ক্ষেত্রের সাহায্যে ঐ অতি-তড়িৎবাহিতাকে নষ্ট করে দেওয়া যায়, তাহলে সীসাটি আবার তাপের সুপরিবাহী হয়।

ক্রিয়াকক্ষে রাখা প্যারাম্যাগনেটিক লবণটির চুম্বকন প্রক্রিয়ার সময় উপরের তাপ কপাটটি চুম্বকত্ব লাভ করে, কিন্তু নীচেরটি করে না। আবার, বিচুম্বকন করার সময়, ঠিক উলটো ব্যাপারটি ঘটে। এই চক্রটি (চুম্বকন—বিচুম্বকন) প্রায় দুমিনিট করে সময় নেয় এবং প্রায় 30 মিনিটের শেষে তলার কুণ্ডটির তাপমাত্রা প্রায় 2° কেলভিনে পৌঁছায়। এই নক্সা অনুযায়ী চৌম্বক হিমায়ন যন্ত্র তৈরী করা হয়েছে যা গবেষণার কাজে বহুল ব্যবহার করা হয়।

পরমাণু কেন্দ্রীয় বিচুম্বকন প্রণালীর দ্বারা শীতলীকরণ

পরমাণুকেন্দ্রীয় চুম্বক আয়ন চুম্বকের তুলনায় অনেক কম শক্তিশালী। কাজেই, এদের পোলারিত (polarised) করতে ·01° কেলভিনের কাছাকাছি তাপমাত্রার প্রয়োজন হয় এবং 50 থেকে 100 কিলো ওরস্টেড এর মত চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োজন হয়। যদি এই পোলারিত কেন্দ্রীনগুলির উপর উভমুখী (revrsible) তাপরুদ্ধ বিচুম্বকন প্রণালী ক্রিয়া করে, তাহলে ঐগুলির তাপমাত্রা 10^{-5} ডিগ্রী কেলভিনের কাছে নেমে যাবে।

10^{-3} ডিগ্রী কেলভিনের নীচে তাপমাত্রা নামানর জন্য প্রথমে আয়ন বিচুম্বকন এবং পরে পরমাণুকেন্দ্রীয় বিচুম্বকন প্রণালীর বিভিন্ন ধাপগুলি ছবিতে দেখান হয়েছে।



২০নং চিত্র—পরমাণু কেন্দ্রীয় বিচুম্বকন প্রণালী।

ছবিতে যে ইলেকট্রনিক অংশ দেখা যাচ্ছে তাতে ক্রোমিয়াম পটাসিয়াম এ্যালাম থাকে, যার মধ্যে এনামেল করা ·0003 ইঞ্চি ব্যাসের 1500 তামার তার বসান থাকে। তামার তার গুলির 8 ইঞ্চি মত অংশ সোজা থাকে এবং তারপর বাঁকিয়ে মুড়ে দেওয়া হয়। এইভাবে পরমাণু কেন্দ্রীয় অবস্থার তৈরী করা হয়। ক্রোমিয়াম আয়নের সাহায্যে আয়নিত বিচুম্বকন করা হয় এবং তামার কেন্দ্রীনগুলির সাহায্যে কেন্দ্রীয় বিচুম্বকন করা হয়। ছবিতে যে চারটি ধাপ দেখান হয়েছে সেগুলি হল ঃ

(ক) ইলেকট্রনিক স্তরের সমতাপে চুম্বকন করা।

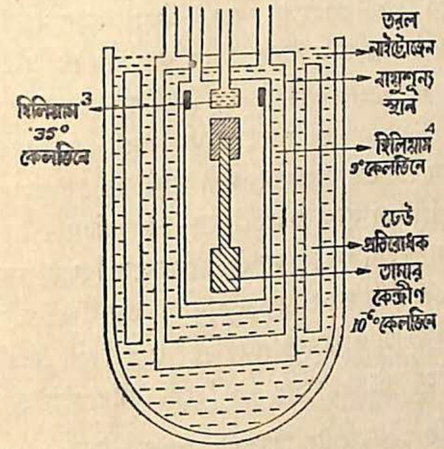
(খ) ঐ স্তরের তাপরুদ্ধ বিচুম্বকন এবং সেইসাথে কেন্দ্রীনস্তরের তাপমাত্রা 10^{-2} ডিগ্রী কেলভিনে নামিয়ে আনা।

(গ) কেন্দ্রীনস্তরের সমতাপে চুম্বকন করা।

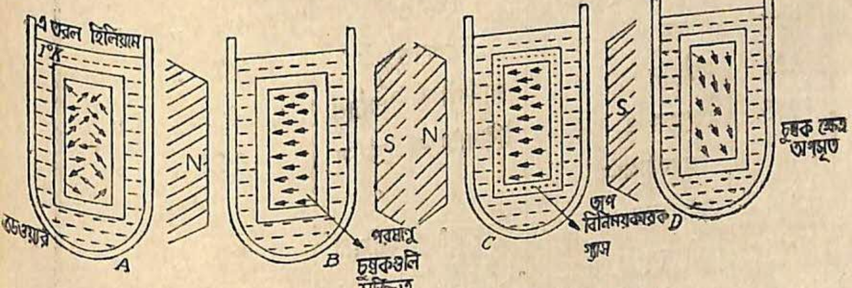
(ঘ) কেন্দ্রীনস্তরের তাপরুদ্ধ বিচুম্বকন এবং সেইসঙ্গে তাপমাত্রা 10^{-5} ডিগ্রী কেলভিন পর্যন্ত নেমে যাওয়া।

এই পরীক্ষায় তড়িৎকুণ্ডলীর (সলিনয়েড) এর মধ্যে কয়েক হাজার এ্যামপীয়ার তড়িৎপ্রবাহ পাঠিয়ে চুম্বকক্ষেত্র তৈরী করা হয়। এই ধরণের পরীক্ষাকার্যে সবচেয়ে অসুবিধা হল ইলেকট্রনিক ও কেন্দ্রীন স্তরের মধ্যে তাপ-চলাচল। সমতাপ চুম্বকন প্রক্রিয়ার সময় এই তাপসঞ্চালন ভাল হওয়া চাই। আবার বিচুম্বকন প্রক্রিয়ার সময় এটি আবার খারাপ হওয়া চাই। তামার তার এই উভয়বিধ কাজ মোটামুটিভাবে করে।

কীটেল (Kittel) একটি পদ্ধতির কথা বলেছেন। এই পদ্ধতিতে কেন্দ্রীন চুম্বকগুলিকে 1° কেলভিন তাপমাত্রায় সুস্থির (stable) চুম্বকক্ষেত্রে রেখে মাইক্রোতরঙ্গ দিয়ে পোলারিত করা হবে। তারপর, তাপরুদ্ধভাবে ঐ উচ্চ কম্পাঙ্কের ক্ষেত্র সরিয়ে নিলে, তাপমাত্রা 10^{-3} ডিগ্রী কেলভিনে নেমে যাবে। তখন আবার বিচুম্বকন পদ্ধতি প্রয়োগ করলে তাপমাত্রা 10^{-7} ডিগ্রী কেলভিন পর্যন্ত নেমে যাবে, এই পদ্ধতিতে একটা সুবিধা হল, যেহেতু কেন্দ্রীন চুম্বকস্তরেই প্রক্রিয়াগুলি করা হচ্ছে, তাপসঞ্চালনের সমস্যাটা থাকছে না। পরপৃষ্ঠায় পরমাণুকেন্দ্রীয় বিচুম্বকন প্রণালীর দ্বারা তৈরী নিম্নতাপ যন্ত্রের নিদর্শনিক (symbolic) চিত্র দেওয়া হল।



২১নং চিত্র—(ক) পরমাণু কেন্দ্রীয় নিম্নতাপমাত্রা সৃষ্টি যন্ত্রের নিদর্শনগত চিত্র।



(খ) পরমাণু কেন্দ্রীয় বিচুম্বকন প্রণালীর বিভিন্ন ধাপ।

কতটা নিম্নতাপ সৃষ্টি করা গিয়েছে

স্বভাবতঃই মনে প্রশ্ন জাগতে পারে, এখন পর্যন্ত কতটা নিম্নতাপমাত্রা বিজ্ঞানীরা সৃষ্টি করতে পেরেছেন? এর উত্তরে বলা যায় যে, সর্বশেষ যে পদ্ধতি নিয়ে আমরা আলোচনা করেছি সেই পরমাণু কেন্দ্রীয় বিচুম্বন প্রণালী অবলম্বন করে বিজ্ঞানী কুর্টি (Kurti) ১৯৬০ সালে 10^{-6} ডিগ্রী কেলভিন তাপমাত্রা সৃষ্টি করতে সমর্থ হয়েছেন। এর নীচে তাপমাত্রা সৃষ্টি করার কথা এখনও শোনা যায় নাই; এই তাপমাত্রা সৃষ্টি করতে গিয়ে কি পরিমাণ সূক্ষ্ম বৈজ্ঞানিক ও কারিগরি কৌশল প্রয়োগ করতে হয়েছে তা ভাবলে বিস্ময় বোধ করতে হয়। অবশ্য, এই কৃতিত্ব কোন একজন বিজ্ঞানীর নয়। এর পিছনে রয়েছে অসংখ্য বিজ্ঞানীর অনলস পরিশ্রম ও গবেষণা। এই 10^{-6} ডিগ্রী কেলভিন তাপমাত্রা সৃষ্টি করতে পারা বিজ্ঞানীদের কতখানি কৃতিত্বের পরিচায়ক তা সামান্য একটি

স্তম্ভলেখ ৫ঃ কতটা নিম্নতাপমাত্রা সৃষ্ট হয়েছে

সাল	বিজ্ঞানীর নাম	কোন দেশের অধিবাসী	কত তাপমাত্রা সৃষ্টি করতে পেরেছেন
1877	কেইলেটেট	ফ্রান্স	90·2 ডিগ্রী কেলভিন
1884	রবলেউস্কি ও ওলজিউস্কি	পোল্যাণ্ড	77·3 ,, ,,
1898	ডেওয়ার	ইংল্যাণ্ড	20·4 ,, ,,
1908	কেমারলিঙ্ ওনেস	হল্যাণ্ড	4·2 ,, ,,
1920	কীজম্	হল্যাণ্ড	0·7 ,, ,,
1927	সাইমন	জার্মানী ও ইংল্যাণ্ড	4·2 ,, ,,
1933	জোকে ও ম্যাকডুগাল	ইউনাইটেড স্টেটস্	0·25 ,, ,,
1934	কাপিৎসা	ইংল্যাণ্ড ও রাশিয়া	4·2 ,, ,,
1946	কলিনস্	ইউনাইটেড স্টেটস্	2·0 ,, ,,
1956	সাইমন ও কার্টি	ইংল্যাণ্ড	10^{-5} ,, ,,
1960	কার্টি	ইংল্যাণ্ড	10^{-6} ,, ,,

উদাহরণ দিলেই বোঝা যাবে। লোকে কথায় বলে 'বরফের মত ঠাণ্ডা'—সেই বরফের তাপমাত্রা এই তাপমাত্রা থেকে 10^8 গুণ বেশী। অথচ যে সূর্য প্রচণ্ড তাপের উৎস, সেই সূর্যের পৃষ্ঠের তাপমাত্রা বরফের তাপমাত্রা থেকে মাত্র 20 গুণের কিছু বেশী। এর থেকেই বোঝা যায় যে, নিম্নতাপমাত্রাবিজ্ঞানের অগ্রগতি কি বিস্ময়কর। অথচ, এই অগ্রগতি হয়েছে বলতে গেলে অপেক্ষাকৃত খুবই কম সময়ে। পূর্বপৃষ্ঠায় যে তালিকাটি দেওয়া হয়েছে, তাতে দেখান হয়েছে মাত্র একশত বৎসরের মধ্যে নিম্নতাপমাত্রাবিজ্ঞানের অগ্রগতি কতটা হয়েছে।

পরমশূন্য তাপমাত্রায় পৌঁছান যাবে কি?

'অবশেষে আসিল! আসিল!! আসিল!!! যে পরমশূন্য তাপমাত্রার জন্য বিশ্ববাসী আহার নিদ্রা ঘুচাইয়া সুদীর্ঘকাল যাবৎ প্রতীক্ষা করিতে ছিলেন, অবশেষে বিখ্যাত বিজ্ঞানী ডক্টর ক উহা তাঁহার গবেষণাগারে সৃষ্টি করিতে সমর্থ হইয়াছেন। তাঁহার এই সাফল্য সত্যই বিস্ময়কর।'—এমন একটি 'চাঞ্চল্যকর সংবাদ' খবরের কাগজে একদিন বের হতে পারে কি? আজ থেকে প্রায় সত্তর বৎসর পূর্বেও বিজ্ঞানীরা মনে করতেন, এরকম ঘটতে পারে, কিন্তু আজকের বিজ্ঞানীরা তা মনে করেন না। কেন? এর উত্তর দিতে গেলে কতকগুলি কথা আগে বলতে হবে।

খুবই স্বাভাবিক ভাবে এটা মনে হতে পারে যে, বিজ্ঞানীরা যখন 10^{-6} ডিগ্রী কেলভিন পর্যন্ত তাপমাত্রা সৃষ্টি করতে পেরেছেন, তখন তার চেয়েও নিম্ন-তাপমাত্রা তাঁরা হয়ত একদিন সৃষ্টি করতে পারবেন। যেমন, যে 'কেন্দ্রীয় বিচুম্বকন প্রণালী' অবলম্বন করে 10^{-6} ডিগ্রী কেলভিন পর্যন্ত তাপমাত্রায় পৌঁছান গিয়েছে, সেই প্রণালী যদি পুনঃ পুনঃ প্রয়োগ করা হয়, তবে তার চেয়েও নীচে তো তাপমাত্রা নেমে যাবে। মনে করা যাক, এই প্রক্রিয়ায় প্রথমে কোন তাপমাত্রা, যথা T_1 এ সমতাপ অবস্থায় বস্তুর কেন্দ্রীনকে চুম্বকন করা হয়। তারপর, তাপরুদ্ধভাবে বিচুম্বচন করলে ঐটির তাপমাত্রা T_2 তে নেমে যাবে, $T_2 < T_1$। এখন দ্বিতীয়বারে, আবার T_2 তে বস্তুকে রেখে সমতাপ অবস্থায় চুম্বকন প্রক্রিয়া প্রয়োগ করিবার পর তাপরুদ্ধভাবে বিচুম্বকন করলে তাপমাত্রা আরও নীচে, যথা, T_3 তে নেমে যাবে, $T_3 < T_2$। আবার, T_3 তে বস্তুটি রেখে অনুরূপভাবে প্রথমে সমতাপ অবস্থায় চুম্বকন এবং পরে রুদ্ধতাপ অবস্থায় বিচুম্বকন করলে তাপমাত্রা আরও নীচে T_4 এ নেমে যাবে। এইভাবে প্রক্রিয়াটি পুনঃ পুনঃ প্রয়োগ করলে এক

সময় নিশ্চয়ই পরমশূন্য তাপমাত্রায় পৌঁছান যাবে। কিন্তু ব্যাপারটি কি সত্যই এরূপ হবে ?

পরীক্ষা নিরীক্ষার ফলে দেখা গিয়েছে যে, সব হিমায়ন প্রক্রিয়ারই এটি প্রাথমিক বৈশিষ্ট্য যে, যত নিম্নতাপমাত্রায় পৌঁছান যায়, ততই আরও নিম্ন-তাপমাত্রায় পৌঁছান বেশী কষ্টকর হয়ে দাঁড়ায়। কারণ, অনেকগুলি বিষয় বাধা হয়ে দাঁড়াতে থাকে। যেমন, কোন তরল যত ঠাণ্ডা হবে, তত তার বাষ্পচাপও কমে যাবে। ফলে বাষ্পকে পাম্প করে ফেলে আরও ঠাণ্ডা করা উত্তরোত্তর কঠিন হবে। বিচুম্বকন প্রণালীতে শীতল করতে গেলেও একইরকম বাধা আসে। যদি একবার বিচুম্বকন করলে প্রারম্ভিক তাপমাত্রা T_1 এর $\frac{1}{10}$ ভাগ তাপমাত্রা T_2 সৃষ্টি করা হয়, তবে দ্বিতীয়বার বিচুম্বকন প্রক্রিয়ায় আবার T_2 র $\frac{1}{10}$ ভাগ তাপমাত্রা T_3 সৃষ্ট হবে। এইভাবে অসংখ্যবার ঐ প্রক্রিয়া চালিয়ে যেতে হবে যতক্ষণ না তাপমাত্রা ক্রমাগত কমতে কমতে অবশেষে পরম-শূন্য হয়। পরমশূন্য তাপমাত্রা সৃষ্টি করার ব্যাপারটাও অনেকটা এই। পরীক্ষা নিরীক্ষা লব্ধ ফল থেকে একথা সাধারণভাবে বলা যেতে পারে যে, 'কোন নির্দিষ্ট সংখ্যক প্রক্রিয়ায় পরম শূন্য তাপমাত্রায় পৌঁছান সম্ভব নয়।' একে 'তাপগতি বিদ্যার' তৃতীয় সূত্রের 'অপ্রাপনীয় বক্তব্য' (unattainable statement) বলা হয়। আবার, একে পরমশূন্য তাপমাত্রা সম্পর্কে 'অনিশ্চয়তার নীতি'ও বলা হয়। তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রের যেমন কয়েকটি রূপ আছে, তৃতীয় সূত্রেরও সেরূপ কয়েকটি রূপ আছে। যেমন, এনট্রপির (entropy) পরিবর্তন রূপেও তৃতীয় সূত্রকে প্রকাশ করা যায়। উদাহরণস্বরূপ, কোন কঠিন বস্তুর উভমুখী (reversible) সমতাপ সংনমন প্রক্রিয়াকালে যে এনট্রপির পরিবর্তন হয়, তাকে এভাবে হিসাব করা যায় ঃ

$$\Delta S_T = S(T, P_1) - S(T, O) = -\int_0^{P_1} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P dP \quad \cdots \quad (14)$$

তাপমাত্রা T কমলে ΔS_T কমবে, কারণ ঐ প্রকাশনের দক্ষিণাংশ তাপ কমার সাথে কমে। তেমনই, সমতাপে উভমুখী চুম্বকন প্রক্রিয়ায় কোন প্যারাম্যাগনেটিক লবণের এনট্রপির মান তাপমাত্রা কমার সাথে হ্রাস পাবে, কারণ এক্ষেত্রে এনট্রপির পরিবর্তন হল ঃ

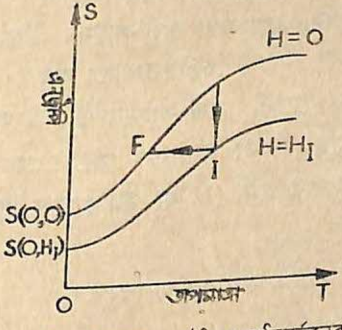
$$\Delta S_T = S(T, H_1) - S(T, O) = \int_0^{H_1} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_H \partial H \quad \cdots \quad (15)$$

এখানে H হল চুম্বকক্ষেত্র এবং M হল চুম্বকন।

এবং এটির দক্ষিণ অংশে $\left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_H$ তাপমাত্রা কমার সাথে কমে যায়। পরীক্ষালব্ধ ফলাফল থেকে বলা যায় যে, পদার্থটি যদি কঠিন বা তরল (অর্থাৎ কিনা ঘনীভূত অবস্থায়) অবস্থায় থাকে, তবে তাপমাত্রা কমার সাথে সাথে তার এনট্রপিরও পরিবর্তন কম হবে। কাজেই, বলা যায়, 'কোন ঘনীভূত তন্ত্রর (system) উপর উভমুখী সমতাপ প্রক্রিয়া কার্য করলে তার ফলে যে এনট্রপির পরিবর্তন হবে, তা তাপমাত্রা যতই পরমশূন্যের দিকে যাবে, ততই শূন্যের কাছাকাছি হবে।'

এই বক্তব্যকে তাপগতি বিদ্যার তৃতীয় সূত্রের নার্ন্স্ট-সাইমন উক্তি (Nerst-Simon statement) বলা হয়। নার্ন্স্ট ১৯০৭ সালে এ সম্পর্কে তাঁর গবেষণালব্ধ ফলাফল প্রকাশ করেন। সেই থেকে প্রায় ৩০ বৎসর কাল 'নার্ন্স্ট-সাইমন' উক্তি বা 'অপ্রাপনীয় উক্তি' কোনটাই বিজ্ঞানীরা সহজে মেনে নেন নাই। কিন্তু এই সুদীর্ঘকালব্যাপী গবেষণা ও নানা পরীক্ষা নিরীক্ষার ফলে অবশেষে সকলে এই সত্যটি মেনে নিয়েছে যে, প্রকৃতপক্ষে পরমশূন্য তাপমাত্রায় পৌঁছান সম্ভবপর নয়।

নার্ন্স্ট-সাইমন উক্তি বা অপ্রাপনীয় উক্তি—দুটোই যে এক তা সহজে প্রমাণ করা যায়। মনে করা যাক, কোন প্যারাম্যাগনেটিক লবণের উপর এমনভাবে বিচুম্বকন প্রক্রিয়া প্রয়োগ করা হয়েছে যে, সেই সময় এনট্রপির পরিবর্তন হচ্ছে না। লেখচিত্রে এই প্রক্রিয়াটি $I \rightarrow F$ রূপে দেখান হয়েছে।



২২নং চিত্র—শীতলীকরণে এনট্রপির পরিবর্তনের লেখচিত্র।

$S(O, H_I)$ এবং I বিন্দুর মধ্যে এনট্রপির পরিবর্তনকে এইভাবে লেখা যায়,

$$S_I - S(O, H_I) = \int_0^{T_F} \frac{C_{H=HI}}{T} dT \quad \ldots(16)$$

এখানে C_H হচ্ছে স্থির চুম্বকক্ষেত্রে তাপক্ষমতা।

যেহেতু, $S_I = S_F$ এবং

$$S(O, H_I) - S(O, O) = L_T\,[S(T, H_I) - S(T, O)]$$

$$Lt_{T \to 0}\left[S(T, H_I) - S(T, O)\right] = \int_0^{T_F} \frac{C_{H=0}}{T}\,dT - \int_0^{T_I} \frac{C_{H=HI}}{T}\,dT \quad \cdots (17)$$

এখন, মনে করা যাক,

U = 'অপ্রাপনীয় উক্তির' সত্যতা

এবং N = 'নার্ণ্স্ট-সাইমন উক্তির' সত্যতা

তাহলে $-U$ = অপ্রাপনীয় উক্তির অসত্যতা

এবং $-N$ = নার্ণ্স্ট-সাইমন উক্তির অসত্যতা

আমরা এখন দেখাব যে, $U = N$। তাহলে, দেখাতে হবে যে অপ্রাপনীয় উক্তি অসত্য হলে নার্ণ্স্ট-সাইমন উক্তিও অসত্য হবে ; অর্থাৎ $-U) - N$। আবার, পক্ষান্তরে, নার্ণ্স্ট-সাইমন উক্তির অসত্যতা অপ্রাপনীয় উক্তির অসত্যতা প্রতিষ্ঠিত করবে, অর্থাৎ কিনা $-N) - U$ হবে।

এখন, প্রথমতঃ ধরা যাক যে, এমন একটি প্রারম্ভিক তাপমাত্রা T_I পাওয়া গেল যার ফলে শেষে তাপমাত্রা $T_F = 0$ এবং যার জন্য অপ্রাপনীয় উক্তিটি অসত্য অর্থাৎ $-U$ হবে। কিন্তু এর ফলে আবার (17)নং সমীকরণের বামপার্শ্বটি ঋণাত্মক হয়ে যাবে, যার জন্য নার্ণ্স্ট-সাইমন উক্তিটি অসত্য অর্থাৎ $-N$ হবে, কাজেই, $-U) - N$; দ্বিতীয়তঃ, ধরা যাক (17)নং সমীকরণের বামপার্শ্বটির মান ঋণাত্মক, কাজেই নার্ণ্স্ট-সাইমন উক্তিটি অসত্য অর্থাৎ $-N$ হবে, কিন্তু তাহলে আবার (17)নং সমীকরণ থেকে এমন একটি প্রারম্ভিক তাপমাত্রা T_I পাওয়া যাবে যার জন্য (17)নং সমীকরণের দ্বিতীয় ইন্টিগ্রালটির

অর্থাৎ $\left(\int_0^{T_I} \frac{C_{H=H_I}}{T}\,dT\right)$ মান ঋণাত্মক হবে।

এর ফলে, প্রথম ইন্টিগ্রালটির $\left(\int_0^{T_F} \frac{C_{H=0}}{T}\,dT\right)$ মান শূন্য হবে।

কাজেই অপ্রাপনীয় উক্তিটি অসত্য অর্থাৎ $-U$ হবে। সুতরাং $-N) - U$, কাজেই, যুক্তিধারা অনুসরণ করে দেখান যায় যে, নার্ণ্স্ট-সাইমন উক্তি ও

অপ্রাপনীয় উক্তি একই। তৃতীয় সূত্রের আর একটি রূপ আছে যাকে এইভাবে প্রকাশ করা যায় ঃ

'কোন সীমিত সংখ্যক প্রক্রিয়ার দ্বারা কোন বস্তুর এনট্রপিকে তার শূন্য বিন্দু (zero-point) মানে নেওয়া সম্ভব নয়।' এই উক্তিটিও যে অন্য দুটি উক্তির সমার্থক তা যুক্তিদ্বারা সহজেই প্রমাণ করা যায়।

তাহলে দেখা যাচ্ছে যে, যতই পরমশূন্য তাপমাত্রায় পৌঁছাতে চেষ্টা করা হোক না কেন, পরমশূন্য চিরদিন 'অধরা' থেকে যাবে।

দ্বিতীয় পরিচ্ছেদ

নিম্নতাপমাত্রা কিভাবে মাপা হয়

নিম্নতাপমাত্রা সৃষ্টি করার সাথে যে আর একটি সমস্যা খুবই বড় হয়ে দেখা দেয় তা হল তাপমাত্রাকে সূক্ষ্মভাবে ও নিখুঁতভাবে পরিমাপ করা। খুবই কম তাপমাত্রায়, যেমন কিনা, পরমশূন্য তাপমাত্রার কাছাকাছি গিয়ে ·01 ডিগ্রী কেলভিন বা আরও কম তাপমাত্রারও পরিবর্তন ঘটান প্রচণ্ড কষ্টকর ব্যাপার। সেখানে, যদি তাপমাত্রা নিখুঁতভাবে মাপতে পারা না যায়, তাহলে তাপমাত্রার কতটা পরিবর্তন ঘটল তা জানা যাবে না।

কিন্তু তাপমাত্রা পরিমাপের বিষয় আলোচনা করতে গেলে প্রথমে বিভিন্ন থার্মমিটার স্কেল সম্পর্কে কিঞ্চিৎ বলা দরকার। তাপমাত্রা পরিমাপ করার জন্য বিভিন্ন ধরণের থার্মমিটার স্কেল প্রচলিত আছে। ইউনাইটেড ষ্টেটস্ এবং গ্রেট ব্রিটেনে যে স্কেল সবচেয়ে বেশী প্রচলিত তা হল ফারেনহাইট স্কেল। এই স্কেলে জলের হিমাঙ্ক হল 32 ডিগ্রী এবং স্ফুটনাংক হল 212 ডিগ্রী। এই স্কেল সাধারণতঃ কারিগরি কাজে এবং ডাক্তারি কাজে ব্যবহৃত হয়।

আবার ইউরোপে যে স্কেল সবচেয়ে বেশী ব্যবহৃত হয় তা হল সেণ্টিগ্রেড স্কেল। বৈজ্ঞানিক গবেষণায় এই স্কেলের ব্যবহার খুব বেশী। এই স্কেলে জলের হিমাঙ্ক হল 0 ডিগ্রী এবং স্ফুটনাংক হল 100 ডিগ্রী।

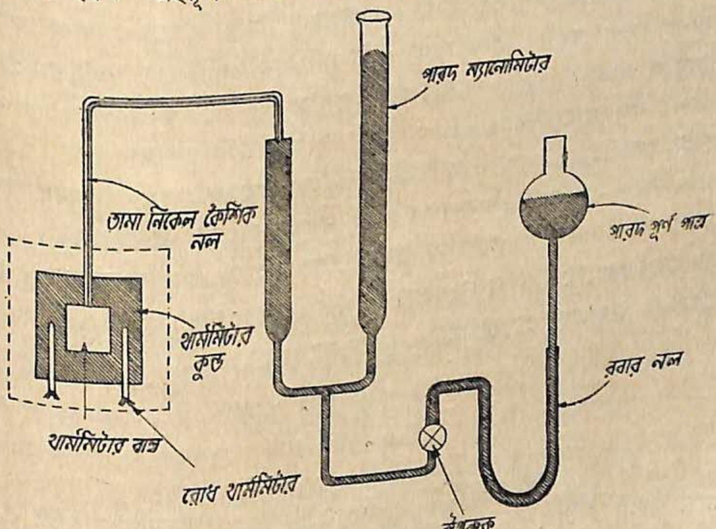
রোমার স্কেল (Reaumar) বলে একটি স্কেল আবিষ্কৃত হয়েছিল, কিন্তু তা খুব বেশী চলে না। এই স্কেলের সর্বনিম্ন বিন্দু, 0 ডিগ্রী, হল হিমাঙ্ক। কিন্তু সর্বোচ্চ বিন্দু জলের স্ফুটনাংক নয়, এ্যালকোহলের স্ফুটনাংক।

কিন্তু বৈজ্ঞানিক গবেষণার দিক দিয়ে যে থার্মমিটার স্কেল সবচেয়ে বেশী নিখুঁত ও সঠিকভাবে কার্যকরী তা হল কেলভিন স্কেল। লর্ড কেলভিন একটি তাপমাত্রার স্কেল প্রণয়ন করেন যা কিনা কোন বিশেষ পদার্থের ধর্মের উপর নির্ভর করে না। সেজন্য এটি হল তাপমাত্রা পরিমাপের একটি মানক (standard) স্কেল এবং একে তাপগতিবিদ্যা স্কেলও বলা হয়ে থাকে। এই স্কেলে সর্বনিম্ন বিন্দু বা শূন্য বিন্দু হল পরমশূন্য তাপমাত্রা। এই স্কেলে জলের হিমাঙ্ক হল 273·18 ডিগ্রী। নিম্নতাপমাত্রা পরিমাপ করার কাজে এই স্কেল খুবই সাহায্য করে।

এখন, কি প্রকারের থার্মমিটার ব্যবহার করা হবে তা নির্ভর করে কিরকম তাপমাত্রা পরিমাপ করতে হবে এবং কতটা সূক্ষ্মভাবে মাপতে হবে। সাধারণ তাপমাত্রা মাপতে গেলে আমরা পারদ থার্মমিটার ব্যবহার করি, কিন্তু পারদ নিম্নতাপমাত্রায় ব্যবহার করা যায় না, কারণ, পারদ $-39°$ সেণ্টিগ্রেড তাপমাত্রায় জমে যায়। কঠিন কার্বনডাইঅক্সাইড এবং তরল বায়ুর তাপমাত্রা পর্যন্ত অবশ্য টলুয়েন (Toluene), পেনটেন (Pentane) প্রভৃতি ব্যবহার করা যায়। কিন্তু তার নীচে ঐগুলি আর ব্যবহার করা যায় না। কাজেই, মোটামুটিভাবে নিম্ন-তাপমাত্রা পরিমাপ করতে গেলে অন্য প্রকার থার্মমিটারের কথা ভাবতে হয়। এই ধরণের বিভিন্ন থার্মমিটারের কথা আলোচনা করব।

গ্যাস থার্মমিটার

স্থির আয়তন বা স্থির চাপ গ্যাস থার্মমিটার নিম্নতাপমাত্রা পরিমাপ করতে ব্যবহৃত হয়। স্থির আয়তন গ্যাস থার্মমিটারে কোন গ্যাসের আয়তন স্থির রেখে তাপমাত্রার পরিবর্তনের সাথে সাথে তার চাপের পরিবর্তন কতটা হল তা মাপা হয়। এইরূপ একটি থার্মমিটারের ছবি নীচে দেওয়া হল।



২৩ক নং চিত্র—স্থির আয়তন গ্যাস থার্মমিটার।

একটি ডেওয়ার ফ্লাস্কের সাহায্যে তাপ কুণ্ডকে ঢেকে রাখা হয়, যার সাথে খুব সরু নলের মাধ্যমে পারদ ম্যানোমিটারের সংযোগ থাকে। ডেওয়ারের মধ্যে

তাপমাত্রার যতই পরিবর্তন হতে থাকে, ততই কুণ্ডের মধ্যস্থিত গ্যাসের আয়তনও পরিবর্তিত হতে থাকে। কিন্তু পারদপূর্ণ পাত্রটি ওঠানামা করে ঐ গ্যাসের আয়তন স্থির রাখা হয় (একটা সূচকের সাহায্যে তা বোঝা যায়)। যেহেতু, ম্যানোমিটারের বাম দিকের নলে পারদের আয়তন স্থির থাকে, পারদপূর্ণ পাত্রের ওঠানামার জন্য ম্যানোমিটারের দক্ষিণ দিকের নলের মধ্যস্থ পারদের উচ্চতার হেরফের ঘটে। এই থার্মমিটারের অবশ্য নানা অসুবিধাও আছে। যেমন, একটা খুব বড় অসুবিধা হল, যে গ্যাস নেওয়া হবে তার স্ফুটনাংকের নীচে আর তাকে ব্যবহার করা তো যাবেই না, এমন কি সংকট মানের কাছাকাছি আসলে তার নির্দেশে প্রচুর ভুল থেকে যাবে।

নিম্নতাপমাত্রা পরিমাপ করতে সাধারণতঃ হাইড্রোজেন বা হিলিয়াম গ্যাস এই ধরণের থার্মমিটারে ব্যবহার করা হয়। হিলিয়াম গ্যাসের স্ফুটনাংক খুবই নীচে অর্থাৎ 4·2 ডিগ্রী কেলভিন বলে সেই তাপমাত্রা পর্যন্ত একে স্বচ্ছন্দে ব্যবহার করা চলে। কিন্তু তার নীচে চাপ হ্রাস করে একে আরও নীচে যথা প্রায় 1° কেলভিন পর্যন্ত ব্যবহার করা চলে।

গ্যাস থার্মমিটারগুলির দ্বারা তাপমাত্রা পরিমাপ করতে গেলে কতকগুলি অসুবিধা দেখা দেয়। তার মধ্যে যেটি সর্বপ্রধান, সেটি হল, এই যে, প্রকৃত গ্যাসগুলি (real gases) বয়েল-এর সূত্র অর্থাৎ $pv =$ ধ্রুবক মেনে চলে না। সেজন্য কিছু 'সংশোধন' (correction) এর প্রয়োজনীয়তা দেখা দেয়। এখন পূর্বেই বলা হয়েছে যে, গ্যাস থার্মমিটারগুলির সাহায্যে দুভাবে তাপমাত্রা মাপা যেতে পারে—হয় আয়তনকে স্থির রেখে, নতুবা চাপকে স্থির রেখে। মনে করা যাক, কোন প্রকৃত গ্যাসযুক্ত থার্মমিটারের সাহায্যে গ্যাসের আয়তন ও চাপ যথাক্রমে স্থির রেখে কোন তাপমাত্রা t পরিমাপ করা হল। তাহলে, গ্যাসকে স্থির আয়তনে রেখে যে তাপমাত্রা পাওয়া যাবে, তা হবে

$$t_v = \frac{p_t - p_0}{p_{100} - p_0} \times 100$$

p_0, p_{100} ও p_t হচ্ছে যথাসময়ে জলের হিমাঙ্কে, বাষ্পাঙ্কে ও t ডিগ্রী তাপমাত্রায় গ্যাসটির চাপ। অনুরূপভাবে, গ্যাসটিকে স্থিরচাপে রেখে যে তাপমাত্রা পাওয়া যাবে, তা হবে

$$t_p = \frac{v_t - v_0}{v_{100} - v_0} \times 100$$

v_0, v_{100} ও v_t হচ্ছে যথাক্রমে জলের হিমাঙ্কে, বাষ্পাঙ্কে ও t ডিগ্রী তাপমাত্রায় গ্যাসটির আয়তন। এখন গ্যাসটি যদি **বয়েল**-এর সূত্র মেনে চলত তাহলে আমরা পেতাম,

$$v_o p_t = (pv)_t = v_t p_0,$$

যদি কিনা উভয় ক্ষেত্রেই একই গ্যাস নেওয়া হয়ে থাকে। তাহলে t_v ও t_p কে আমরা এভাবে লিখতে পারি,

$$t_v = \frac{(pv)_t - (pv)_0}{(pv)_{100} - (pv)_0} \times 100$$

এবং $$t_p = \frac{(pv)_t - (pv)_0}{(pv)_{100} - (pv)_0} \times 100$$

কাজেই, গ্যাসটি যদি **বয়েল**-এর সূত্র মেনে চলে তাহলে

$$t_v = t_p = t$$

কিন্তু প্রকৃত গ্যাসের ক্ষেত্রে $pv =$ ধ্রুবক এই সম্পর্ক খাটে না। সেক্ষেত্রে আমরা পাই,

$$pv = A + Bp + Cp^2 + Dp^3 + \cdots\cdots$$

A, B, C, D প্রভৃতি হচ্ছে ধ্রুবক এবং তাপমাত্রার উপরে ঐগুলি নির্ভরশীল।

এখন, C, D প্রভৃতি ধ্রুবকগুলির পরিমান খুবই কম বলে ওগুলিকে অগ্রাহ্য করে লেখা যায়

$$pv = A + Bp$$

এই সমীকরণ থেকে দেখা যাচ্ছে যে,

$$p \to 0 \qquad pv = A$$

অর্থাৎ কিনা চাপের পরিমাণ খুবই কম বলে, প্রকৃত গ্যাস ও আদর্শ গ্যাসের সাহায্যে পাওয়া তাপমাত্রা একই হবে। এইজন্য প্রকৃত গ্যাসের ক্ষেত্রে প্রথমে তাপমাত্রা পরিমাপ করে, তারপর প্রাপ্ত ফলাফলগুলিকে অত্যন্ত নিম্নচাপে টেনে নিয়ে (extrapolate) হিসাব করলে আদর্শ গ্যাসের দ্বারা প্রাপ্ত তাপমাত্রা বের হবে।

মনে করা যাক, গ্যাসের স্থির আয়তনে কোন একটি বিশেষ তাপমাত্রা t পরিমাপ করা হচ্ছে। প্রকৃত গ্যাসের ক্ষেত্রে বিভিন্ন তাপমাত্রায় গ্যাস সমীকরণগুলি হবে এইরূপ

$$p_0 v_0 = A_0 + B_0 p_0$$
$$p_{100} v_0 = A_{100} + B_{100} p_{100}$$
$$p_t v_0 = A_t + B_t p_t,$$

এখানে v_0 হচ্ছে স্থির আয়তন এবং $A_0, B_0, A_{100}, B_{100}, A_t, B_t$ হচ্ছে হিমাঙ্ক, বাষ্পাঙ্ক ও t তাপাঙ্কে ধ্রুবকগুলির মান। এখন গ্যাসের স্থির আয়তনে তাপমাত্রা t_v হচ্ছে

$$t_v = \frac{p_t - p_0}{p_{100} - p_0} \times 100$$

$$= \frac{v_0 p_t - v_0 p_0}{v_0 p_{100} - v_0 p_0} \times 100 \quad (v_0 \text{ দিয়ে গুণ করে})$$

$$= \frac{(A_t - A_0) + (B_t p_t - B_0 p_0)}{(A_{100} - A_0) + (B_{100} p_{100} - B_0 p_0)} \times 100$$

(গ্যাস সমীকরণের সাহায্যে)

$$= \frac{A_t - A_0}{A_{100} - A_0} 100 \left[\frac{1 + (B_t p_t - B_0 p_0)/(A_t - A_0)}{1 + (B_{100} p_{100} - B_0 p_0)/(A_{100} - A_0)}\right]$$

$$= \frac{A_t - A_0}{A_{100} - A_0} 100 \left[1 + \frac{B_t p_t - B_0 p_0}{A_t - A_0} - \frac{B_{100} p_{100} - B_0 p_0}{A_{100} - A_0}\right]$$

(**বাইনমিলার** সূত্র প্রয়োগ করে এবং উচ্চতর পদগুলি অগ্রাহ্য করে)

$$= t_{lim} \left[1 + \frac{B_t p_t - B_0 p_0}{A_t - A_0} - \frac{B_{100} p_{100} - B_0 p_0}{A_{100} - A_0}\right]$$

$\frac{A_t - A_0}{A_{100} - A_0} \cdot 100$ কে t_{lim} বলা হচ্ছে, কারণ প্রারম্ভিক চাপ খুব কম হলে অর্থাৎ $p \to 0$, এই তাপমাত্রা পাওয়া যেত। কাজেই এক্ষেত্রে গ্যাসটি **বয়েল**-এর সূত্র না মানার জন্য যে সংশোধনের প্রয়োজন হচ্ছে, তা হল

$$t_{lim} - t_v = t_{lim} \left[\frac{B_{100} p_{100} - B_0 p_0}{A_{100} - A_0} - \frac{B_t p_t - B_0 p_0}{A_t - A_0}\right]$$

অনুরূপভাবেই দেখান যায় যে গ্যাসটিকে স্থির চাপে রেখে যে তাপমাত্রা t_p পাওয়া যাবে, তার ক্ষেত্রে সংশোধনটি হবে এইরূপ,

$$t_{lim} - t_p = t_{lim} p_0 \left[\frac{B_{100} - B_0}{A_{100} - A_0} - \frac{B_t - B_0}{A_t - A_0}\right]$$

পূর্বের দুইটি সমীকরণ থেকে, স্থির আয়তন ও স্থির চাপে গ্যাসটির সাহায্যে যে তাপমাত্রা পাওয়া যাচ্ছে, তার সংশোধনীপদ কি হবে তা আমরা পাচ্ছি।

লক্ষ্যণীয় যে, কোন প্রকৃত গ্যাসের স্থির আয়তন ও স্থির চাপ এই উভয় ক্ষেত্রেই তাপমাত্রা পরিমাপে $t_{lim} = \frac{A_t - A_0}{A'_{100} - A_0} 100$ একই থাকছে। এর থেকে আদর্শ গ্যাস-স্কেলে, যাকে সেলসিয়াস স্কেল (Celsius Scale) বলা হয়, তাপমাত্রা t কে এইভাবে লেখা যায়,

$$t = 100 \frac{\lim\limits_{p\to 0}(pv)_t - \lim\limits_{p\to 0}(pv)_0}{\lim\limits_{p\to 0}(pv)_{100} - \lim\limits_{p\to 0}(pv)_0}$$

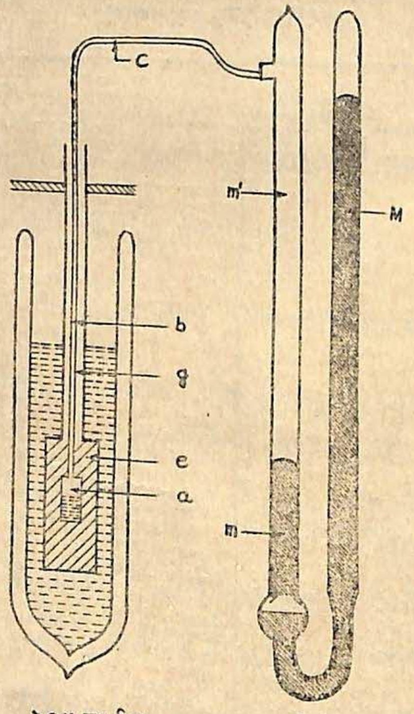
নীচে ৬নং স্তম্ভলেখতে নিম্নতাপমাত্রায় বিভিন্ন গ্যাস থার্মমিটারের সংশোধনী কত হবে তা দেওয়া হল।

স্তম্ভলেখ ৬—নিম্নতাপমাত্রায় বিভিন্ন গ্যাসের ক্ষেত্রে সংশোধনের পরিমাণ

তাপমাত্রা °C	স্থির চাপ			স্থির আয়তন		
	হিলিয়াম	হাইড্রোজেন	নাইট্রোজেন	হিলিয়াম	হাইড্রোজেন	নাইট্রোজেন
−260				+0·041		
−240				+0·033	+0·117	
−220				+0·026	+0·089	
−200				+0·020	+0·069	
−180				+0·015	+0·054	
−183				+0·019	+0·039	
−150	+0·029	+0·265		+0·014	+0·027	
−100	+0·015	+0·138		+0·008	+0·015	+0·052
−50	+0·005	+0·053	+0·399	+0·003	+0·003	+0·015
−25	+0·002	+0·016	+0·112	+0·001	+0·002	+0·006
0	+0·001	+0·007	+0·039			

বাষ্পচাপ থার্মমিটার

এই ধরণের আর এক প্রকার থার্মমিটার হচ্ছে বাষ্পচাপ থার্মমিটার। এর কার্যনীতি হচ্ছে এই যে, কোন তরলের বাষ্পচাপ তাপমাত্রার সাথে সাথে নির্দিষ্ট-ভাবে পরিবর্তিত হয়। নীচে ছবিতে এই ধরণের একটি থার্মমিটার দেখা যাচ্ছে। এতে তরলপূর্ণ একটি ক্ষুদ্র কুণ্ড (bulb) a থাকে, যা কিনা b ও c কৈশিক নলের মাধ্যমে ম্যানোমিটার mm' এর মাঝে যুক্ত থাকে। M হচ্ছে পারদপূর্ণ পাত্র (Reservoir) যা ওঠানামা করে mm' এ পারদের উচ্চতার হেরফের ঘটান যায়। a কুণ্ড এবং কৈশিক নল bর কিছু অংশ তামার নল e দ্বারা ঘেরা থাকে যাতে তাপমাত্রা সমানভাবে ছড়িয়ে পড়ে। bকে আবার বদ্ধ কাঁচের নল g দিয়ে ঢাকা হয়। এর দ্বারা বিকিরণের মাধ্যমে তাপ চলাচল বন্ধ করা হয়। যন্ত্রটির সাহায্যে সঠিকভাবে পরিমাপ করার প্রস্তুতি হিসাবে



২৩খ নং চিত্র—বাষ্পচাপ থার্মমিটার।

প্রথমে m নলে পারদের উচ্চতা নামান হয়, a কুণ্ড এবং সংযোগকারী নলগুলি বায়ুশূন্য করা হয় এবং অবশেষে যে গ্যাসটিকে ব্যবহার করা হবে

তাকে aর মধ্যে ঢোকান হয়। তারপর, পারদপূর্ণ পাত্র Mকে তুলে গ্যাসটিকে কিছুটা সংনমিত করা হয় এবং তার ফলে গ্যাসের কিছুটা অংশ aতে তরলায়িত হয়। তারপর a এবং কিছুটা নলকে যে তরলপদার্থের তাপমাত্রা পরিমাপ করতে হবে তারমধ্যে রাখা হয় এবং ম্যানোমিটার mm'এ বাষ্পচাপ লক্ষ্য করা হয়। এই বাষ্পচাপ জেনে সাথে সাথে তাপমাত্রাও যাতে জানা যায়, তার জন্য কতকগুলি নির্দিষ্ট স্তম্ভলেখ (Table) তৈরী করা আছে।

এই থার্মমিটারগুলির সবচেয়ে অসুবিধা হল এই যে, এদের সাহায্যে খুব বেশী দূর পর্যন্ত তাপমাত্রার পরিমাপ করা যায় না। অক্সিজেন $-150^\circ C$ থেকে -210° সেণ্টিগ্রেড পর্যন্ত, নিয়ন -246° সেণ্টিগ্রেড -249° সেণ্টিগ্রেড পর্যন্ত, হাইড্রোজেন -253° সেণ্টিগ্রেড থেকে -262° সেণ্টিগ্রেড পর্যন্ত এবং হিলিয়াম -268° সেণ্টিগ্রেডের নীচে $272{\cdot}5^\circ$ সেণ্টিগ্রেড পর্যন্ত কার্য করে।

স্তম্ভলেখ ৭—বিভিন্ন তাপমাত্রায় He^4এর বাষ্পচাপ

$T^\circ k$	p (mm)	$T^\circ k$	p (mm)
0·10	$3{\cdot}4\times10^{-32}$	2·50	76·92
0·50	$1{\cdot}6\times10^{-5}$	3·00	181·2
·80	$1{\cdot}1\times10^{-2}$	3·50	353·4
1·00	0·121	4·00	615·6
1·59	3·593	4·21	760·0
2·00	23·45	4·50	980·0

হিলিয়াম বাষ্পচাপ থার্মমিটারকে 0·75 ডিগ্রী কেলভিন তাপমাত্রা পর্যন্ত ব্যবহার করা হয়েছে। ঐ চাপমাত্রায় বাষ্পচাপকে ম্যাকলিয়ড গজ্ (Mcleod gauge) বা ম্যানোমিটার দিয়ে মাপা হয়। কিন্তু এইসব ক্ষেত্রে প্রধান অসুবিধা হল যে, তাপমাত্রার সাথে হিলিয়ামের বাষ্পচাপের সম্পর্কটি খুবই ভালভাবে

জানা প্রয়োজন। এই সম্পর্ক সঠিকভাবে নিরূপন করার জন্য অনেকেই নানারূপ সমীকরণ গঠন করেছেন। ১৯৫৫ সালে ক্লিমেণ্ট ও তাঁর সহযোগীরা যে সমীকরণটি দিয়েছিলেন তা মোটামুটিভাবে কার্যকরী। আবার ভ্যান ডিজ্‌ক্ (Van Dijk) এবং ডুরো (Durieux) তাপগতিবিদ্যার তত্ত্বগত দিক পর্যালোচনা করে চাপ P এবং তাপমাত্রা Tর মধ্যে সম্পর্ক নির্ণায়ক একটি সমীকরণ প্রণয়ন করেন। এই সমীকরণে আদর্শ গ্যাসের ধর্ম থেকে He^4 এর বাষ্পের বিচ্যুতি এবং চাপের সাথে সমগ্র তাপের পরিবর্তন, এই দুইই হিসাব করা হয়েছিল।

ঐ সমীকরণ অনুযায়ী ভ্যান ডিজ্‌ক্ P ও Tর বিভিন্ন মানের একটি স্তম্ভলেখ প্রকাশ করেন। যেটি ১৯৫৮ সালে ওজন ও পরিমাপের আন্তর্জাতিক কমিটির থার্মমিতি সংক্রান্ত উপদেষ্টা সংস্থা কর্তৃক অনুমোদিত হয়েছে এবং '১৯৫৮ সালের He^4 স্কেল' নামে চিহ্নিত হয়েছে।

নীচের ৮নং স্তম্ভলেখতে নিম্নতাপমাত্রায় কতকগুলি স্থিরাঙ্ক দেখান হয়েছে।

স্তম্ভলেখ ৮—নিম্নতাপমাত্রায় কয়েকটি স্থিরাঙ্ক

গ্যাস	সংকট তাপমাত্রা	স্বাভাবিক স্ফুটনাংক
হিলিয়াম^4	$5{\cdot}20°K$ (1718 মিমি চাপ)	$4{\cdot}215°K$ (স্বাভাবিক চাপ)
হাইড্রোজেন	$33°K$ (1·28 মিমি গ্যাস)	$20{\cdot}26°K$ (স্বাভাবিক চাপ)
নাইট্রোজেন	$126{\cdot}26°K$ (33·54 মিমি চাপ)	$77{\cdot}35°K$ (স্বাভাবিক চাপ)
কার্বন ডাইঅক্সাইড	$304°K$ (73 বায়ুচাপ)	

He^3 অধিকতর লঘু হওয়ায় তার বাষ্পচাপের সাহায্যে ·2° কেলভিন তাপমাত্রা পর্যন্ত মাপা যায়। He^3র P ও Tর বিভিন্ন মানের স্তম্ভলেখ

তৈরী করা ভীষণ কষ্টসাধ্য এবং তা রবার্টস, শেরমান, সিডোরিক ও ব্রিকওয়েড এর (Roberts, Sherman, Sydorik and Brickwedde) প্রচেষ্টার ফলে সম্ভব হয়েছে। এই সুস্তলেখও আন্তর্জাতিক কমিটি কর্তৃক অনুমোদিত হয়েছে এবং 'T_{62} স্কেল' নামে চিহ্নিত হয়েছে।

পরিশেষে বলা যায় যে, গ্যাস বা বাষ্পচাপ থার্মোমিটারে নানা অসুবিধা ও ভ্রান্তি সংশোধন দরকার সত্ত্বেও একেই প্রাথমিক থার্মোমিটারের পর্যায়ে ফেলা হয়েছে।

গ্যাস থার্মমিটারগুলি ব্যবহার করা বেশ অসুবিধাজনক এবং এদের দ্বারা তাপমাত্রা পরিমাপ করতে গেলে নানারূপ সংশোধন করতে হয়। তাই দ্বিতীয় পর্যায়ক্রমিক (Secondary) কতকগুলি ধরণের থার্মমিটার ব্যবহার করা হয়। যেমন, রোধ থার্মমিটার, তাপযুগ্ম থার্মমিটার ইত্যাদি। এদের কয়েকটি সম্পর্কে সংক্ষেপে আলোচনা করা হচ্ছে।

রোধ থার্মমিটার

নিখুঁতভাবে তাপমাত্রা পরিমাপ করার জন্য রোধ থার্মমিটারের ব্যবহার খুবই প্রচলিত। এর কার্যনীতি হল যে, তাপমাত্রার পরিবর্তনের সাথে সাথে ধাতুর বৈদ্যুতিক রোধের পরিবর্তন হয়। বিশুদ্ধ ধাতুর রোধ তাপমাত্রা কমার সাথে সাথে কমতে থাকে, যদি সামান্য মাত্রও অন্য কোন বস্তু ধাতুতে বর্তমান থাকে, তাহলে তাপমাত্রা সঠিকভাবে মাপা যাবে না, কারণ সেক্ষেত্রে বৈদ্যুতিক রোধের পরিবর্তন অন্যরূপ হবে, তাপমাত্রার সাথে রোধের সম্পর্ক নিম্নলিখিত সমীকরণ দিয়ে প্রকাশ করা যায়ঃ

$$t = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0}\ 100 + \delta\left(\frac{t}{100} - 1\right)\frac{t}{100} + \epsilon\left(\frac{t}{100} - 1\right)\frac{t^3}{100^3} \quad \ldots \ldots \quad (19)$$

এখানে, $R_t \rightarrow t^\circ C$ তাপমাত্রায় ধাতুর রোধ

$R_{100} \rightarrow 100^\circ C$ " " "

$R_0 \rightarrow 0^\circ C$ " " "

$\epsilon \rightarrow$ একটি ধ্রুবক

এবং $\delta \simeq \dfrac{\beta(100)^2}{\alpha + 100\beta}$

α ও β হল দুটি ধ্রুবক এবং তাদের এইভাবে প্রকাশ করা যায়,

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2) \quad \ldots \quad \ldots \quad (20)$$

R_t, R_0, R_{100}, δ, ϵ প্রভৃতির মান বিভিন্ন তাপমাত্রায় বের করা হয়।

প্লাটিনাম রোধ থার্মমিটারের সাহায্যে 4° কেলভিন পর্যন্ত তাপমাত্রা পরিমাপ করা যায়। বিশুদ্ধ তামার তার $20°K$ পর্যন্ত এবং বিশুদ্ধ সীসা $9°K$ পর্যন্ত ব্যবহার করা যায়। বিশুদ্ধ ইণ্ডিয়াম ধাতু $3{\cdot}4°K$ পর্যন্ত তাপমাত্রা মাপতে পারে, তার নীচে এটি অতি তড়িৎ পরিবাহী হয়ে পড়ে। ইণ্ডিয়ামই একমাত্র ধাতু থাকে ঘরের সাধারণ তাপমাত্রা থেকে শুরু করে 3·4° কেলভিন পর্যন্ত তাপমাত্রার মাপার কাজে ব্যবহার করা যায়।

অর্ধপরিবাহী রোধ থার্মমিটার

অর্ধপরিবাহীগুলির বৈশিষ্ট্য হল যে, তাপমাত্রার পরিবর্তনের সাথে সাথে এদের রোধ এক্সপোনেণ্ট ভাবে (exponentially) পরিবর্তিত হয় এবং তাপমাত্রা কমালে এদের রোধ বৃদ্ধি পায়, কাজেই, এদের সাহায্যে তাপমাত্রা মাপা সহজ, কারণ খুব কম তাপমাত্রায় এদের রোধ প্রচুর বৃদ্ধি পায়, যা কিনা বিশুদ্ধ ধাতুর ধর্মের ঠিক উল্টো। **জোকে** (Giauque) ১৯৩৬ সালে প্রথম কার্বন-রোধ থার্মমিটার ব্যবহার করেছিলেন, কার্বন রোধ থার্মমিটারের সুবিধা হল এদের তাপক্ষমতা খুবই কম। কাজেই, তাপমাত্রার সামান্য পরিবর্তনও এদের সাহায্যে সহজে বোঝা যায়, আর, তাপমাত্রা কমবার সাথে সাথে এদের বৈদ্যুতিক রোধও খুব দ্রুতবৃদ্ধি পায় এবং চুম্বকক্ষেত্রের উপস্থিতিতে এদের ক্রিয়ার পরিবর্তন হয় না। **ক্লিমেণ্ট** (Clement) এরূপ থার্মমিটারের সাহায্যে নিম্নতাপমাত্রায় প্রচুর পরীক্ষাকার্য চালিয়েছেন। তিনি এদের ক্ষেত্রে রোধ R এবং তাপমাত্রা Tর মধ্যে কয়েকটি কার্যকরী (empirical) সম্পর্ক বের করতে চেষ্টা করেন। এরূপ একটি সম্পর্ক, যার সাহায্যে বেশ ভালভাবেই (এক ডিগ্রীর প্রায় সহস্রাংশ ভাগ পর্যন্ত সূক্ষ্মভাবে) তিনি তাপমাত্রা মাপতে পেরেছিলেন, নীচে দেওয়া হল,

$$\sqrt{\log R/T} = a + b \log R$$

a এবং b হচ্ছে ধ্রুবক, যা পরীক্ষানিরীক্ষা করে বের করা হয়। কিন্তু বর্তমানে ডোপড্ জার্মেনিয়ামকে (doped germanium) একাজে খুব বেশী ব্যবহার করা হচ্ছে।

তাপযুগ্ম থার্মমিটার

তাপযুগ্ম হচ্ছে একজোড়া বিসদৃশ ধাতু জুড়ে দিয়ে তৈরী একরকম যন্ত্র যার জোড়গুলিতে উষ্ণতার তারতম্য হলে বিদ্যুৎচাপের সৃষ্টি হয়। এই যন্ত্রগুলির সাহায্যেও তাপমাত্রা মাপা যায়, কিন্তু এইগুলি নিম্নতাপমাত্রায় খুব বেশী স্পর্শকাতর (sunsitive) নয়। তামা ও কনষ্টানাটন্ ধাতু জুড়ে তাপযুগ্ম তৈরী করে জোকে ও তার সহযোগীরা $12°K$ পর্য্যন্ত তাপমাত্রা মাপতে পেরেছিলেন। এছাড়া, সোনা-রূপা এবং প্লাটিনাম-রূপার তাপযুগ্ম নিম্নতাপমাত্রা পরিমাপ করতে খুবই উপযোগী। অবশ্য তাপমাত্রা খুবই নীচে হলে সোনা-কোবাল্ট সংকর ধাতুর এবং রূপা-তামার সংকর ধাতুর তাপযুগ্ম তৈরী করে ব্যবহার করা হয়। এরকম তাপযুগ্ম $17°K$ থেকে $2.5°K$ পর্য্যন্ত তাপমাত্রা সঠিকভাবে মাপতে পারে। বিভিন্ন তাপমাত্রায় তাপযুগ্মটির তাপীয় তড়িৎ-চালক বল (Thcrmo e.m.f.) বের করে তার স্কেল ঠিক করা হয়। যে ধরণের সমীকরণের সাহায্যে এর পরিমাপ করা হয় তার একটি নীচে দেওয়া হচ্ছে,

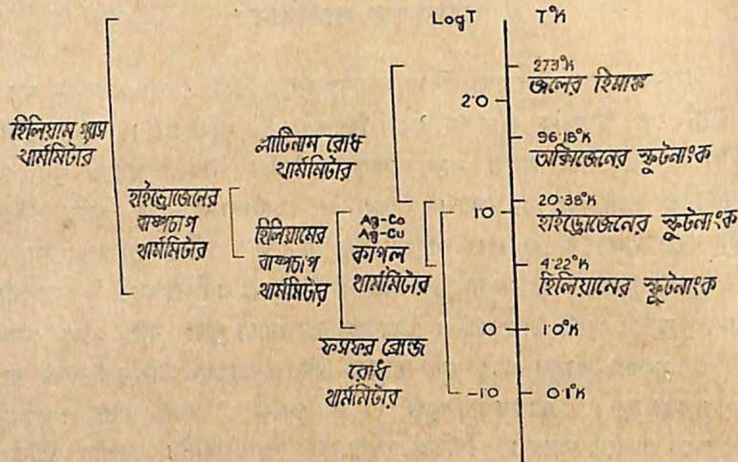
$$\epsilon = a + bt + ct^2 + dt^3$$

এখানে ϵ হচ্ছে তাপীয় তড়িৎচালক বল এবং a, b, c, d হচ্ছে বিভিন্ন তাপযুগ্মর জন্য ধ্রুবক।

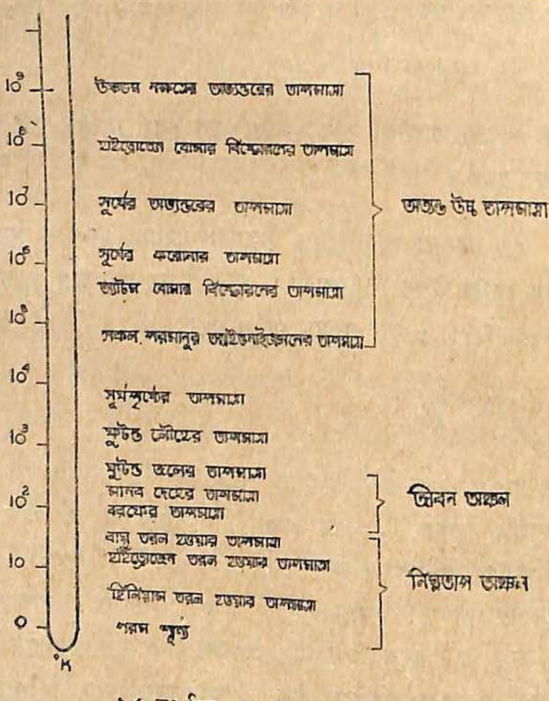
আরও এক ধরনের থার্মমিটার নিম্নতাপমাত্রায় ব্যবহৃত হয়, যা কিনা পদার্থের চুম্বক ধর্মের উপর নির্ভরশীল। কুরীর সূত্র অনুসারে প্যারাম্যাগনেটিক্ পদার্থের চৌম্বকগ্রাহীতা χ কে এভাবে লেখা যায়,

$$\chi = \frac{C}{T}$$

C হচ্ছে কুরীয় ধ্রুবক এবং T হচ্ছে পরম তাপমাত্রা। যদি কোন নির্দ্ধারিত তাপমাত্রায় কুরীয় ধ্রুবক C বের করা যায়, তাহলে ঐ প্যারাম্যাগনেটিক লবণকে থার্মমিটাররূপে ব্যবহার করা চলতে পারে। $1°$ কেলভিন এর নীচে চুম্বক-থার্মমিটারের গুরুত্বপূর্ণ ব্যবহার হয়, কারণ সেক্ষেত্রে তাপমাত্রার সামান্য পরিবর্তনের জন্য চৌম্বকনের পরিমাণ অনেকাংশে পরিবর্তিত হয়। পরপৃষ্ঠায় একটা লগারিদমিক স্কেল দেওয়া হল যাতে দেখান হচ্ছে বিভিন্ন তাপমাত্রায় কি কি ধরনের থার্মমিটার ব্যবহার করা প্রশস্ত।



২৪ নং চিত্র—বিভিন্ন তাপমাত্রায় কি কি ধরনের থার্মমিটার ব্যবহৃত হয়।



২৫ নং চিত্র—পরম তাপমাত্রার স্কেল

২৫ নং চিত্রে পরম তাপমাত্রার একটি আপেক্ষিক স্কেল দেখান হয়েছে। ঐ স্কেলে বিশেষ বিশেষ তাপমাত্রায় কি কি ঘটে তাও দেখান হয়েছে।

তৃতীয় পরিচ্ছেদ

নিম্নতাপমাত্রায় পদার্থের ধর্ম

সাধারণ তাপমাত্রায় কোন পদার্থের যে সব ভৌত বা রাসায়নিক ধর্ম দেখা যায়, নিম্নতাপমাত্রায় সেসব ধর্মের বেশ কিছুটা পরিবর্তন ঘটে, কোন কোন ক্ষেত্রে সম্পূর্ণ নূতন একটি ধর্ম ও লক্ষ্য করা যায়। এখন আমরা আলোচনা করব নিম্নতাপমাত্রায় পদার্থের কিছু কিছু ধর্মের কিরূপ পরিবর্তন ঘটে।

প্রথমে রাসায়নিক ধর্মের কথাই ভাবা যাক। তাপমাত্রা নেমে গেলে, পদার্থের রাসায়নিক ক্রিয়া অনেক কমে যায়। ডেওয়ার লক্ষ্য করেছিলেন যে, $-180°$ সেণ্টিগ্রেড তাপমাত্রার নীচের দিকে কোন রাসায়নিক বিক্রিয়া ঘটে না। সেইজন্য, নিম্নতাপমাত্রায় খাদ্যসংরক্ষণ করতে সুবিধা হয়। অতি নিম্নতাপ-মাত্রায়ও কোন কোন জীবাণু বেঁচে থাকতে পারে, তবে তাদের সক্রিয়তা অনেক কমে যায়। নিম্নতাপমাত্রায় কতকগুলি কৌতূহলদ্দীপক ঘটনা লক্ষ্য করা যায়। যেমন, তরল বায়ু, তরল নাইট্রোজেন প্রভৃতির মধ্যে কোন সতেজ ফুল চুবিয়ে তুললে পর দেখা যায় যে ঐটি শক্ত হয়ে গিয়েছে। তরল বায়ুতে জীবন্ত মাছ চুবিয়ে তুললে ঠিক মাটীর মাছের মত শক্ত হয়ে যায়। তরল বায়ু শরীরের কোথাও পড়লে সে স্থানের তাপমাত্রা সহসা প্রচণ্ড নেমে যাওয়ার ফলে সে স্থানে ফোস্কা পড়ে যায়। তরল বায়ুতে আঙ্গুল ছুঁইয়ে তুললে আঙ্গুল অসাড় হয়ে যায়।

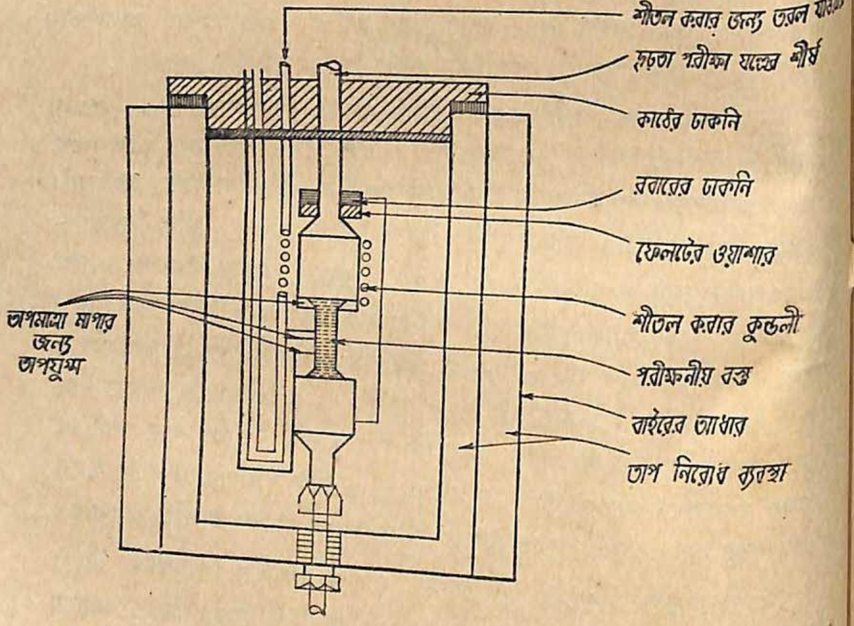
নিম্নতাপমাত্রায় পদার্থের ভৌতধর্মের মধ্যেও লক্ষ্যণীয় পরিবর্তম ঘটে। সাধারণ তাপমাত্রায় সীসার প্লাষ্টিক ধর্ম দেখা যায়। কিন্তু নিম্নতাপমাত্রায় সীসা ইলাষ্টিক হয়ে পড়ে। আবার কোন কোন ধাতু ভঙ্গুর হয়ে পড়ে। তরল বায়ুর তাপমাত্রায় তুলা, কাঠ, ডিম প্রভৃতি জিনিস ইষৎ ভাস্বর (luminons) হয়ে ওঠে। রবার ও অন্যান্য কিছু জিনিস ভঙ্গুর হয়। এখন, নিম্নতাপ-মাত্রায় যেসব ভৌতধর্মের বিশেষ পরিবর্তন ঘটে সেগুলি আলোচিত হচ্ছে।

নিম্নতাপমাত্রায় পদার্থের দৃঢ়তা

নিম্নতাপমাত্রায় পদার্থের ভৌত ধর্মাদির কতকগুলি লক্ষ্যণীয় পরিবর্তন ঘটে, যেমন অনেক ক্ষেত্রেই দেখা যায় যে নিম্নতাপমাত্রায় পদার্থ ভঙ্গুর হয়ে

গিয়েছে। কাজেই, নিম্নতাপমাত্রায় যেসব যন্ত্রাদি ব্যবহৃত হয়, তাদের ঋজুতা কিরূপ বজায় থাকে তা সঠিকভাবে পরীক্ষা করে জানা প্রয়োজন। এরূপ পরীক্ষার জন্য একটি বিশেষ ধরণের যন্ত্র ব্যবহৃত হয়।

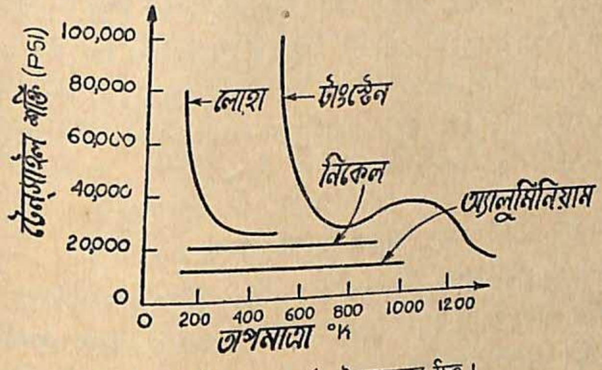
সাধারণতঃ দেখা গিয়েছে যে, যেসব ধাতুর কেলাস গঠন হল দেহকেন্দ্রিক ঘনক (Body centered cubic), তাদের ঋজুতা নিম্নতাপমাত্রায় বৃদ্ধি পায়।



২৬ নং চিত্র—পদার্থের দৃঢ়তা পরীক্ষার যন্ত্র।

এই কারণে লোহা, টাংস্টেন, মলিবডেনাম প্রভৃতি ধাতু নিম্নতাপমাত্রায় ব্যবহৃত যন্ত্রাদি তৈরীতে কাজে লাগে না। আবার, অন্যদিকে, তামা, নিকেল, এ্যালুমিনিয়াম প্রভৃতি যেসব ধাতুর কেলাস গঠন মুখকেন্দ্রীক ঘনক (Face centered cubic), তাদের নিম্নতাপমাত্রায় ঋজুতার খুব সামান্যই হেরফের ঘটে। কিন্তু নিম্নতাপমাত্রায় যন্ত্রাদি তৈরী করতে ঋজুতাই একমাত্র বিবেচ্য নয়। কারণ, কোন কোন ধাতু অত্যন্ত দৃঢ় হলেও নিম্নতাপমাত্রায় খুবই ভঙ্গুর হয়ে যায়, আবার কতকগুলি খুব বেশী দৃঢ় না হয়েও আবার বেশ ঋজু হয়। পরবর্তী

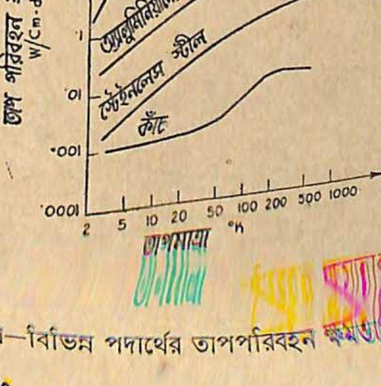
২৭ নং লেখচিত্রে, কতকগুলি ধাতুর টানদৃঢ়তার (Tensile strength) তাপমাত্রার সাথে সাথে পরিবর্তনের হার দেখান হচ্ছে।



২৭ নং চিত্র—পদার্থের টানদৃঢ়তার চিত্র।

নিম্নতাপমাত্রা পদার্থের তাপ পরিবহন ক্ষমতা

বিশুদ্ধ ধাতু, সংকরধাতু ও ডাইলেকট্রিক (dilectric)—যাদের দ্বারা নিম্নতাপমাত্রায় কার্যের যন্ত্রপাতি তৈরী করা হয়, তাদের তাপ পরিবহনক্ষমতা একপ্রকার নয়। নীচে লেখচিত্রে কতকগুলি বিশুদ্ধ ধাতু, সংকর ধাতু ও ডাইলেকট্রিকের



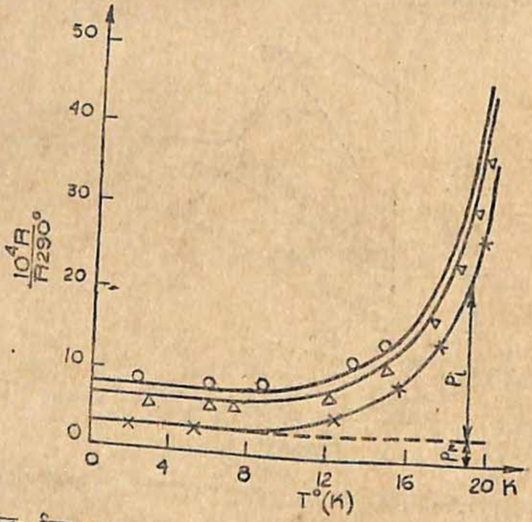
২৮ নং চিত্র—বিভিন্ন পদার্থের তাপপরিবহন ক্ষমতার লেখচিত্র

তাপপরিবহন ক্ষমতা নিম্নতাপমাত্রায় কিরূপ হয় দেখান হল। $20^\circ K$ থেকে $50^\circ K$ তাপমাত্রার কাছাকাছি সাধারণতঃ তাপপরিবহন ক্ষমতা তুঙ্গে ওঠে। এই তাপমাত্রা অঞ্চলে আবার বিশুদ্ধ ধাতুর তাপপরিবহন ক্ষমতা সংকর ধাতুর

তাপপরিবহন ক্ষমতার প্রায় ১০০ গুণ বেশী হয়। যেসব ডাইলেকট্রিকের গঠন কেলাসিত নয়, তাদের তাপপরিবহন ক্ষমতা খুব কম, যেমন কাঁচ, প্লাষ্টিক প্রভৃতি। আবার, যাদের গঠন কেলাসিত, যেমন হীরা, পান্না প্রভৃতির তাপপরিবহন ক্ষমতা খুবই বেশী। ধাতুদের তাপপরিবাহিত Kর মধ্যে দুটি অংশ আছে, একটি হল কেলাসজালিক তাপারিবাহিতা (Lattice thermal conductivity) Kg এবং ইলেকট্রনীয় (Electronic) তাপপরিবাহিতা Ke। এবং $K = Ke + Kg$. বিশুদ্ধ ধাতুর ক্ষেত্রে $Ke \gg Kg$.

তড়িৎ পরিবাহিতা

নিম্নতাপমাত্রায় তাপ পরিবাহীতার ন্যায় তড়িৎ পরিবাহীতার ক্ষেত্রেও উল্লেখযোগ্য পরিবর্তন ঘটে। যতই তাপমাত্রা কমতে থাকে ততই বিশুদ্ধ ধাতুর তড়িৎ পরিবাহীতা বৃদ্ধি পেতে থাকে, কারণ কেলাস জালিক বিন্দুগুলির (Lattice points) স্পন্দন স্তিমিত হওয়ার জন্য পরিবাহী (conduction) ইলেকট্রনগুলির প্রবাহে বাধা হ্রাস পেতে থাকে, যার জন্য তড়িৎ রোধ কমতে থাকে। তড়িৎ পরিবাহিতা σ এবং তাপ পরিবাহিতা Kর মধ্যে একটি সম্পর্ক আছে, সেটি হল, $K/\sigma T =$ ধ্রুবক, T হল পরম তাপমাত্রা। ধ্রুবকটিকে বলা হয় লোরেঞ্জ সংখ্যা L (Lorentz number)।



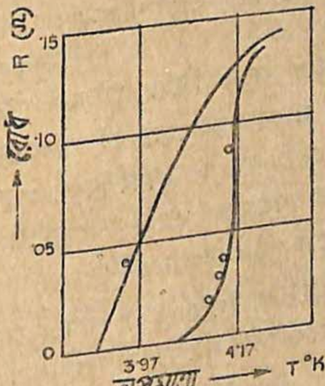
২৯ নং চিত্র—নিম্নতাপমাত্রায় সোডিয়ামের ৩টি নমুনার রোধের পরিবর্তনের হার

এখন, তাপমাত্রা খুব বেশী নেমে গেলে দেখা যায় যে, বিশুদ্ধ ধাতুগুলির তাপমাত্রার পরিবর্তনের সাথে আপেক্ষিক রোধ (specific resistance)

ρর $\left(\rho=\frac{1}{\sigma}\right)$ ক্ষেত্রে খুব বেশী হেরফের হয় না। প্রায় সব বিশুদ্ধ ধাতুর ক্ষেত্রে দেখা যায় যে তাপমাত্রা অত্যন্ত হ্রাস করলেও কিছু পরিমাণ রোধ অবশিষ্ট থেকে যায়, যা কিনা তাপমাত্রার সাথে অপরিবর্তনীয় হয়। এই রোধকে বলা হয় অবশিষ্ট রোধ ρr। এটির কারণ হল ধাতুর মধ্যে অবিশুদ্ধতা (impurity), কেলাস-জালিক গঠনের ত্রুটি (Lattice defect) প্রভৃতি। কাজেই ধাতুর আপেক্ষিক রোধ ρ তে দুটি অংশ আছে, একটি হল আদর্শ রোধ ρi, যা কিনা তাপমাত্রা নামলে হ্রাস পায় এবং অবশিষ্ট রোধ ρr ; $\rho=\rho i+\rho r$। জার্মেনিয়াম, ধূসর টিন, সিলিকন প্রভৃতি অর্ধপরিবাহী ধাতুর ক্ষেত্রে আবার তাপমাত্রা কমালে রোধ বাড়তে থাকে। উপরের ২৭নং লেখচিত্রে নিম্নতাপমাত্রায় সোডিয়ামের রোধ কিরূপে পরিবর্তিত হয় তা দেখান হয়েছে। এখানে R হচ্ছে কোন বিশেষ তাপমাত্রায় ধাতুর রোধ এবং $R_{290}{}^{\circ}K$ হচ্ছে ঘরের তাপমাত্রায় ধাতুর রোধ।

অতি তড়িৎ পরিবাহীতা

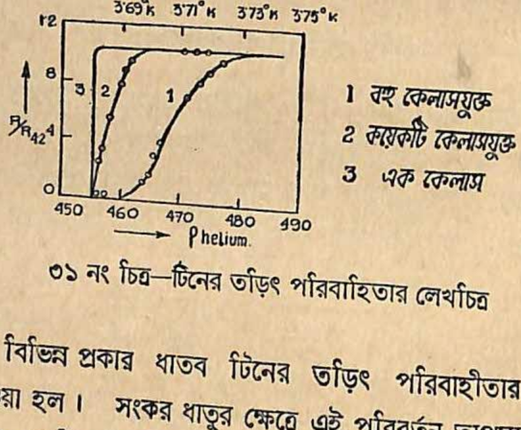
বিখ্যাত ডাচ্ বিজ্ঞানী কামেরলিঙ্ ওনেস্ তরল হিলিয়ামের তাপমাত্রায় বিশুদ্ধ পারদের তড়িৎ রোধ মাপতে গিয়ে দেখলেন যে, তরল হিলিয়ামের স্ফুটনাংকের ঠিক নীচেই তড়িৎ রোধ অত্যন্ত দ্রুত কমে যেতে লাগল এবং 1° সেণ্টিগ্রেডের ১/২০ ভাগ তাপমাত্রা কমতেই তড়িৎ রোধ একেবারে শূন্য হয়ে



৩০ নং চিত্র—পারদের অতি পরিবাহিতার লেখচিত্র

গেল, অর্থাৎ কিনা তড়িৎ রোধ বলে কিছুই থাকল না। এই বিচিত্র ধর্মকে অর্থাৎ একটি নির্দিষ্ট তাপমাত্রায় তড়িৎ রোধ শূন্য হয়ে যাওয়াকে বলা হয়

অতি তড়িৎ পরিবাহীতা বা সংক্ষেপে অতিপরিবাহীতা। কামেরলিঙ্ ওনেস্ দেখেছিলেন যে, $4°K$ তাপমাত্রার কাছাকাছি এসে অনেক ধাতুর তড়িৎ রোধ শূন্য হয়ে যায়। এদের নাম দেওয়া হল অতি পরিবাহী (super conductor)। তাপমাত্রার পরিবর্তনের সাথে সাথে বিশুদ্ধ পারদের তড়িৎ রোধ কিভাবে পরিবর্তিত হয় তা ৩০ নং চিত্রে দেখান হল। খুব বিশুদ্ধ ও পীড়নহীন (strain-free) ধাতুর ক্ষেত্রে সাধারণ পরিবাহীতা থেকে অতি পরিবাহীতার পরিবর্তন হঠাৎ হয়। যেমন, এক-কেলাস টিনের ক্ষেত্রে মাত্র এক ডিগ্রীর $\frac{1}{1500}$ তম ভাগ তাপমাত্রার পরিবর্তনের মধ্যে অতি তড়িৎ পরিবাহীতার উদ্ভব হয়। কিন্তু ধাতু এক-কেলাসের পরিবর্তে বহু কেলাসযুক্ত হলে বা তাতে অন্য পদার্থের অস্তিত্ব থাকলে, পরিবর্তন তাপমাত্রার (Transition temperature) ব্যাপ্তি বৃদ্ধি পায়।



৩১ নং চিত্র—টিনের তড়িৎ পরিবাহিতার লেখচিত্র

উপরে বিভিন্ন প্রকার ধাতব টিনের তড়িৎ পরিবাহীতার পরিবর্তনের লেখচিত্র দেওয়া হল। সংকর ধাতুর ক্ষেত্রে এই পরিবর্তন তাপমাত্রার ব্যাপ্তি $1°$ সেন্টিগ্রেড বা বেশীও হতে পারে। যেসব বিশুদ্ধ ধাতুর ক্ষেত্রে অতি তড়িৎ পরিবাহীতা লক্ষ্য করা গিয়েছে তাদের কয়েকটির নামের ও পরিবর্তন তাপমাত্রার তালিকা পরের পৃষ্ঠায় দেওয়া হল।

এ ছাড়াও রিনিয়াম্ (Re), জিংক (Zn), ক্যাডমিয়াম্ (Cd), হাফ্নিয়াম্ (Hf) প্রভৃতি ধাতুর ক্ষেত্রেও অতি পরিবাহীতা লক্ষ্য করা গিয়েছে।

কোন বিশেষ ধাতুর পরিবাহীতা কোন তাপমাত্রায় দেখা যাবে তা নির্ভর করে তার কেলাস গঠনের উপর। যেমন, দেখা যায় যে, সাদা টিন (White Tin), যার কেলাস গঠন টেট্রাগোনাল (Tetragonal), তার পরিবর্তন তাপমাত্রা হল 3.69° কেলভিন। আর, ধূসর টিন (Gray Tin), যার কেলাস গঠন হল

কিউবিক্ (cubic), তার ক্ষেত্রে 1·29° কেলভিন তাপমাত্রার পূর্বে অতি-পরিবাহীতার সন্ধান পাওয়া যায় না।

স্তম্ভলেখ ৭ : বিভিন্ন ধাতুর পরিবর্তন তাপমাত্রা

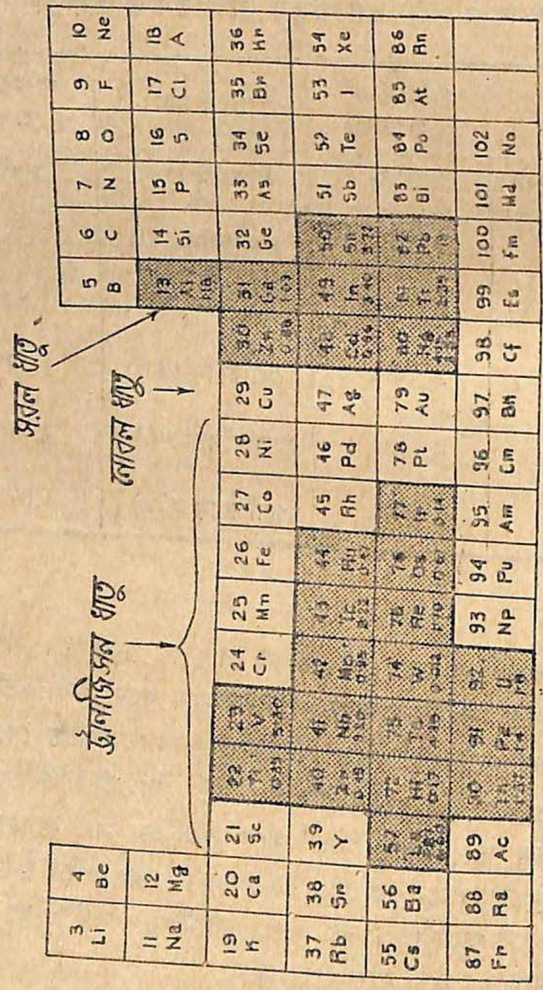
ধাতুর নাম	পরিবর্তন তাপমাত্রা	ধাতুর নাম	পরিবর্তন তাপমাত্রা
নিওবিমিয়াম্ (Nb)	9.22°K	ইণ্ডিয়াম্ (In)	3.37°K
সীসা (Pb)	7.26°K	থ্যালিয়াম্ (Tl)	2.38°K
ল্যান্থানাম্ (La)	4.71°K	টিটানিয়াম্ (Ti)	1.81°K
ট্যাণ্টালাম্ (Ta)	4.38°K	থোরিয়াম্ (Th)	1.32°K
পারদ (Hg)	4.12°K	এ্যালুমিনিয়াম (Al)	1.14°K
টিন্ (Sn)	3.69°K	গ্যালিয়াম্ (Ga)	1.07°K

অতি তড়িৎ পরিবাহীতার ক্ষেত্রে তড়িৎ রোধ যে প্রকৃতপক্ষে সম্পূর্ণভাবে নষ্ট হয়ে যায়, তা নয়, কিন্তু রোধ প্রায় লক্ষগুণ কমে যায় ; তার ফলে ব্যাপারটা এরকম ঘটে যে, যদি পরিবর্তন তাপমাত্রার নীচে কোন ধাতুর কুণ্ডলী রেখে তার কাছে কোন চুম্বক এনে তার মধ্যে আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহ সৃষ্টি করা যায়, তাহলে তড়িৎপ্রবাহ সঙ্গে সঙ্গে নষ্ট হয় না, যেমনটি কিনা সাধারণ তড়িৎ চুম্বকের আবেশের ক্ষেত্রে দেখা যায়। বরং, তড়িৎ প্রবাহটি বেশ কিছুদিন ধরে চলতে থাকে। কারণ, একটি কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহ যে সূত্র অনুসারে কমতে থাকে তা হল

$$i = i_0\, e-(R/L)\, t,$$

এখানে R হচ্ছে কুণ্ডলীর রোধ, L হচ্ছে কুণ্ডলীর নিজ-আবেশ এবং t হচ্ছে সময়। কিন্তু ধাতুটি অতি তড়িৎ পরিবাহী হলে R কমে প্রায় শূন্যের ($\sim 10^{-20}$ ওম্.সে.মি.) সমান হয়ে যায়, ফলে L/R অত্যন্ত বেড়ে যায়। কাজেই আবহ

তড়িৎপ্রবাহ নষ্ট হতে অনেক সময় লাগে। নীচে পর্য্যায় সারণীতে (Pariodic table) অতিপরিবাহী মৌলগুলির অবস্থান দেওয়া আছে। এটা খুবই



৩২ নং চিত্র—পর্য্যায়সারণীতে অতি তড়িৎ পরিবাহীগুলির অবস্থান

আশ্চর্য্যজনক যে, ক্ষার ধাতুগুলির (alkali metals) ক্ষেত্রে বা ক্ষারজাতীয় মৃত্তিকা ধাতুর (alkaline earth metals) ক্ষেত্রে অতি তড়িৎ পরিবাহীতা কখনই দেখা যায় না। 'মহৎ ধাতু' (noble metal) দের ক্ষেত্রেও এটা দেখা যায় না।

এও আশ্চর্য্যজনক যে, কোন অতিপরিবাহী ধাতুই একযোজী (monovalent) নয়। আবার তাদের কারও পাঁচটির বেশী যোজক ইলেকট্রন (valence electron) নেই।

অতি তড়িৎ পরিবাহী সংকর ধাতুগুলির ক্ষেত্রে নানা অদ্ভুৎ ঘটনা লক্ষ্য করা যায়। যেমন, সাধারণতঃ যেসব ধাতব মৌল মিলে সংকর ধাতুটি তৈরী করে, তাদের সংকট তাপমাত্রার মাঝামাঝি ঐ সংকর ধাতুটির সংকট তাপমাত্রাকে পাওয়া যায়, যেমন, Mo এবং Nb ধাতুর সংকর ধাতুর ক্ষেত্রে ঘটে। আবার, একটি আশ্চর্য্যজনক ঘটনা হল যে, এমন কোন কোন সংকর ধাতু আছে, যার উপাদানগুলি অতিতড়িৎপরিবাহী না হয়েও সংকর ধাতুটি অতিতড়িৎপরিবাহী হয়। যেমন, Pt ও Sbর সংকর ধাতু।

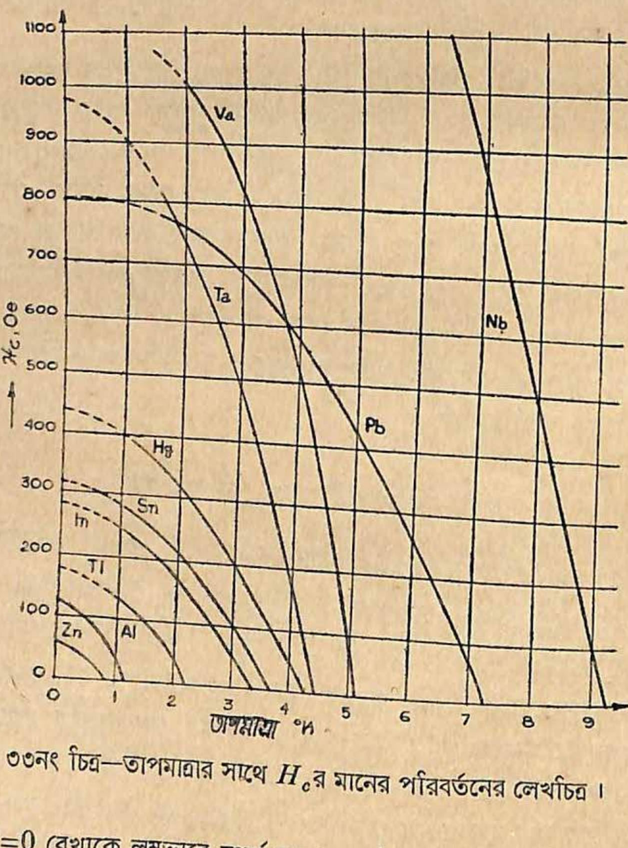
বিভিন্ন ধাতু নিয়ে পরীক্ষা-নিরীক্ষা করে দেখা গিয়েছে যে সংকট তাপমাত্রা Tc বিভিন্ন কারণের উপর নির্ভর করে, যেমন চাপ, ধাতুর পাতের বেধ, ধাতুর উপর স্থির তড়িৎ আধান ইত্যাদি। অধিকাংশ ধাতুর ক্ষেত্রে চাপ বাড়ালে সংকট তাপমাত্রা Tcর মান কমে যায়, কিন্তু কোন কোন ধাতুর ক্ষেত্রে এর উল্টোটাই ঘটে। আবার, অতি পরিবাহী ধাতুকে অতি সূক্ষ্ম পাতলা আস্তরণের মত (Thinfilm) তৈরী করে নিলে দেখা যায় যে, তাদের সংকট তাপমাত্রা Tcর মান অনেক পালটে যায়। এমন কি কোন কোন ক্ষেত্রে ধাতুটি সাধারণ অবস্থায় অতি তড়িৎপরিবাহী না হলেও পাতলা আস্তরণের মত হলে অতিতড়িৎপরিবাহী হয়, যেমন Ge, Bi ইত্যাদি।

অতি তড়িৎবাহীদের চৌম্বক ধর্ম

পর্য্যায় সারণীতে যে ২৬টি ধাতুকে (চিহ্নিত) অতি তড়িৎবাহীরূপে দেখান হয়েছে, তাদের মধ্যে আবার ৯টি ধাতুর কিছু বৈশিষ্ট্য আছে। এই ধাতুগুলি হল Al, Zn, Ga, Cd, In, Sn, Hg, Tl ও Pb। এরা খুবই নরম। এদের গলনাঙ্ক বেশী নয়। এদের বলা হয় 'নরম অতি পরিবাহী'। এদের খুব লম্বা সরু দণ্ডের আকারে ঢালাই করা যায়। এরকম কোন ধাতুর দণ্ডকে যদি সংকট তাপমাত্রার চেয়ে নিম্ন কোন তাপমাত্রায় চৌম্বক ক্ষেত্রে রাখা হয় এবং চৌম্বক ক্ষেত্রের মান শূন্য থেকে ক্রমে ক্রমে বৃদ্ধি করা হয়, তাহলে দেখা যাবে যে চৌম্বক ক্ষেত্রের একটা বিশেষ মান Hc যখন হবে, তখন ধাতুটি আবার অতি পরিবাহী থেকে সাধারণ পরিবাহী হয়ে যাবে। এই চৌম্বক ক্ষেত্র Hcকে বলা হয় সংকট চৌম্বক ক্ষেত্র এবং এটির চেয়ে চৌম্বক ক্ষেত্রের মান সামান্য কম হলেই আবার ধাতুটি অতিপরিবাহী হয়ে যায়।

এখন, যে পরিমাণ চৌম্বক ক্ষেত্র প্রযুক্ত হলে অতিপরিবাহীতা নষ্ট হয়ে যাবে তা তাপমাত্রার উপর নির্ভর করে। 'নরম অতিপরিবাহী'র এবং কিছু ট্রানজিসন্ অতিপরিবাহীর ক্ষেত্রে তাপমাত্রার সাথে Hcর মানের যে পরিবর্তন হয় তা ৩৩নং লেখচিত্র দিয়ে বোঝান হয়েছে।

এই লেখচিত্রে দেখা যাচ্ছে যে, প্রত্যেকটি Hc—T রেখার দুদিকে দুটি অঞ্চল আছে, একদিকে অতিপরিবাহী এবং অন্যদিকে সাধারণ পরিবাহী অঞ্চল। প্রতিটি রেখা ঋণাত্মক দিকে হেলান এবং প্রতিটি রেখা (বাড়িয়ে



৩৩নং চিত্র—তাপমাত্রার সাথে H_cর মানের পরিবর্তনের লেখচিত্র।

দিলে) T=0 রেখাকে লম্বভাবে স্পর্শ করবে। এই সকল নরম অতিপরিবাহীদের ক্ষেত্রে Hc এবং Tর সম্পর্ক মোটামুটিভাবে এভাবে প্রকাশ করা যায় ঃ

$$Hc = Ho\left(1 - \frac{T^2}{Tc^2}\right) \quad \ldots \quad \ldots \quad (21)$$

এখানে Ho হচ্ছে পরমশূন্য তাপমাত্রায় সংকট চৌম্বকক্ষেত্রের মান। লিউইস (Lewis) নরম অতিপরিবাহীদের ক্ষেত্রে দেখিয়েছেন যে, Ho, $Tc^{1\cdot3}$র সাথে সমানুপাতী। অবশ্য, কোন কোন ক্ষেত্রে যেমন কিনা, ১৭টি ট্রানজিসন্ অতি-পরিবাহীদের ক্ষেত্রে, এর সামান্য কিছু হেরফেরও দেখা গিয়েছে। এই ধরণের অতিপারিবাহীদের বলা হয় Iনং শ্রেণীর অতিপরিবাহী।

1 নং তড়িৎপরিবাহীদের ক্ষেত্রে T_c, H_0 এবং সংকট তাপমাত্রায় $\frac{dH_c}{dT}$র মান ৯নং ও ১০নং স্তম্ভলেখতে দেওয়া হল।

৯নং স্তম্ভলেখ—নরম অতি তড়িৎপরিবাহীদের ক্ষেত্রে T_c, H_0 এবং সংকট তাপমাত্রায় $\frac{dH_c}{dT}$র মান

ক্যাডমিয়াম্	T_c °K	H_0 O_e	$\left(\frac{dH_c}{dT}\right)_{T=T_c}$ O_e/deg.
এ্যালুনিয়াম্	1·175	105	−158
দস্তা	0·88	53	−121
গ্যালিয়াম্	1·09	51	−93
ক্যাডমিয়াম্	0·56	30	−86
ইনডিয়াম্	3·41	283	−156
টিন্	3·72	306	−147
পারদ	4·15(α) 3·95(β)	311 339	−194
থ্যালিয়াম্	2·39	171	−126
সীসা	7·19	803	−226

১০নং স্তম্ভলেখ—ট্রানজিশন্ অতি তড়িৎপরিবাহীদের ক্ষেত্রে T_c, H_0 এবং সংকট তাপমাত্রায় $\frac{dH_c}{dT}$ র মান।

ধাতু	T_c °K	H_0 O_e	$\left(\frac{dH_c}{dT}\right)_{T=T_c}$ O_e/deg.
টিটানিয়াম্	0·39	56	−300
ভ্যানাডিয়াম্	5·30	1310	−482
জার্কনিয়াম্	0·49	47	−170
নিওবিমিয়াম্	9·20	1985	−453
মলিবডেনাম	0·95	97	——
টেকনিসিয়াম্	8·22	——	−350
রুথেনিয়াম্	0·47	66	−196
ল্যান্থানাম্	(α) 4·87 (β) 6·00	789 1095	—— ——
হাফনিয়াম্	0·165	——	——
ট্যান্টালাম্	4·48	830	−334
টাংস্টেন্	0·012	107	——
রিনিয়াম্	1·70	201	−235
ওসমিয়াম্	0·67	80	−183
ইরিডিয়াম্	0·14	19	——
থোরিয়াম্	1·37	162	——
প্যালাডিয়াম্	1·4	——	——
ইউরেনিয়াম্	1·8	~2000	——

কামেরলিঙ্ ওনেস্ ১৯১১ সালে লক্ষ্য করেন যে, এই Iনং শ্রেণীর অতি-পরিবাহীদের ক্ষেত্রে সংকট তাপমাত্রায় বৈদ্যুতিক রোধ শূন্য হয়। মাইসনার ১৯৩১ সালে এরূপ একটি অতিপরিবাহীকে একটি ক্ষীণ চৌম্বক ক্ষেত্রে রেখে সংকট তাপমাত্রারও নীচের তাপমাত্রায় শীতল করলেন এবং দেখলেন যে,

তাপমাত্রা কমতে কমতে যে মুহূর্তে ধাতুটি অতিপরিবাহী হল, তখনই সকল চৌম্বক বলরেখাগুলি ধাতুটি থেকে যেন বিতাড়িত হল। ফলে চৌম্বক আবেশ (Magnetic Induction) Bর মান শূন্য হয়ে গেল। এই ঘটনাকে বলা হয় **'মাইসনার প্রতিক্রিয়া'** (Meissner effect)।

অতিপরিবাহীকে চৌম্বকক্ষেত্রে রাখলে যতক্ষণ পর্য্যন্ত চৌম্বকক্ষেত্রের মান H_c না হয়, ততক্ষণ পর্য্যন্ত কোন চৌম্বক বলরেখা অতিপরিবাহীর বেশী অভ্যন্তরে প্রবেশ করতে পারে না। বাইরের চৌম্বক ক্ষেত্র H অতিপরিবাহীর অভ্যন্তরে লম্বভাবে যে দূরত্ব x পর্য্যন্ত পৌঁছাবার পর শূন্য হয়ে যায়, তাকে এই-ভাবে প্রকাশ করা যায়,

$$H_i = He^{-x/\lambda} \qquad \ldots \qquad \ldots (22)$$

λ হচ্ছে অতিপরিবাহীর অভ্যন্তরে লম্বদূরত্ব, যে দূরত্ব পর্য্যন্ত পৌঁছিয়ে চৌম্বক-ক্ষেত্রের মান বাইরের চৌম্বক-ক্ষেত্রের মান H এর $\frac{1}{e}$ অংশে পরিণত হয়। λকে বলা হয় বিদ্ধ-দূরত্ব (Penetration depth)। সোয়েন বার্গ (Shoenberg) প্রথমে পারদ ধাতুতে এই দূরত্ব পরিমাপ করেছিলেন। এই দূরত্বের পরিমাপ মোটামুটিভাবে 5×10^{-6} সে.মি.র মত। দেখা গিয়েছে যে, তাপমাত্রা Tর পরিবর্তনের সাথে সাথে λর যে পরিবর্তন হয়, তাকে এইভাবে লেখা যায়,

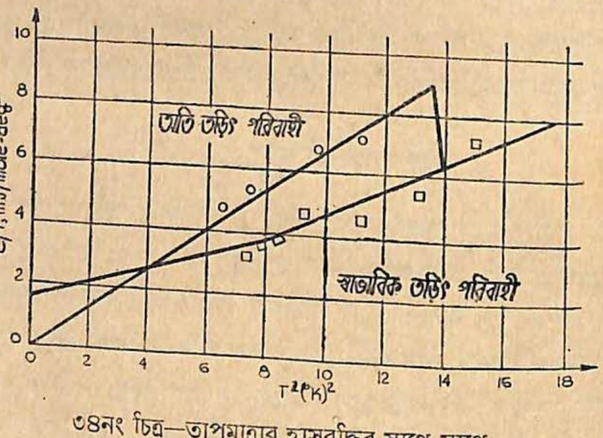
$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - T^4/T_c^4}} \qquad \ldots \qquad \ldots (23)$$

λ_0 হচ্ছে পরমশূন্য তাপমাত্রায় 'বিদ্ধ দূরত্ব'। অতিপরিবাহীদের মুক্ত ইলকট্রনদের মধ্যে পারস্পরিক আকর্ষণ থাকে এবং তা প্রায় 10^{-4} সে.মি. দূরত্ব পর্য্যান্ত ক্রিয়া করে। এই দূরত্বকে বলা হয় ξ। এখন, Iনং শ্রেণীর অতিপরিবাহীদের ক্ষেত্রে (যাদের কথা এতক্ষণ বলা হল), λ, ξ এর চেয়ে অনেক ছোট হয়। কিন্তু আর এক শ্রেণীর অতিপরিবাহী আছে, যাদের ক্ষেত্রে λ, ξ এর চেয়ে অনেক বড় হয়। এদের বলা হয় IIনং শ্রেণীর অতিপরিবাহী। এদের আর একটি প্রধান বৈশিষ্ট্য হল যে, Hc অর্থাৎ যে পরিমাণ চৌম্বক ক্ষেত্রের জন্য অতিপরি-বাহী অবস্থা থেকে সাধারণ পরিবাহী অবস্থা আবার ফিরে দেখা দেয়, তার মান একটি মাত্র নয়, বরং Hcর মান কিছুটা বিস্তৃত, যথা, Hc_1 থেকে Hc_2 পর্য্যন্ত; $Hc_2 > Hc_1$। Hc_1র নীচে একদিকে থাকে অতিপরিবাহী অঞ্চল এবং Hc_2র উপর আর একদিকে থাকে সাধারণ পরিবাহী অঞ্চল। Hc_2 অনেক সময় Hর প্রায় দশগুণ বড় হয়। এর ফলে IIনং শ্রেণীর অতিপরিবাহীরা

অনেক শক্তিশালী চৌম্বক ক্ষেত্রেও, যথা প্রায় 200,000 ওরস্টেড্ এ তাদের অতিপরিবাহীতা বজায় রাখতে পারে। কাজেই, এরা অতিপরিবাহী ধর্ম না হারিয়েও অনেক পরিমাণ তড়িৎ বহন করতে পারে। Hc_1 ও Hc_2র মধ্যবর্তী অঞ্চলকে বলা হয় মিশ্র অঞ্চল (Mixed)।

অতিপরিবাহীদের তাপ-ক্ষমতা

অতিপরিবাহীদের ক্ষেত্রে তাপক্ষমতার পরিমাপ করার জন্য প্রথমে চৌম্বক ক্ষেত্র ছাড়াই সংকট তাপমাত্রার নীচে ও উপরে তাপক্ষমতা মাপা হয়। তারপর, H_cর চেয়ে বৃহত্তর চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োগ করা হয় এবং তাপমাত্রার পরিবর্তনের সাথে সাথে তাপক্ষমতার পরিবর্তন পরিমাপ করা হয়। অতিপরিবাহী ধাতুর তাপক্ষমতা তাপমাত্রার হ্রাসবৃদ্ধির সাথে সাথে কিভাবে পরিবর্তিত হয় তার ধারণা করার জন্য টিনের ক্ষেত্রে প্রাপ্ত তথ্যাদির ভিত্তিতে লেখচিত্রটি (স্কেল অনুযায়ী নয়) সাহায্য করবে (নীচে দেখান হয়েছে)। এতে দেখা যাচ্ছে যে, স্বাভাবিক তড়িৎপরিবাহী অবস্থা থেকে অতিতড়িৎ পরিবাহী অবস্থায় তাপক্ষমতা কিভাবে পরিবর্তিত হয়।



৩৪নং চিত্র—তাপমাত্রার হ্রাসবৃদ্ধির সাথে সাথে তাপক্ষমতার পরিবর্তনের লেখচিত্র।

লেখচিত্রটিতে $C/T - T^2$ রেখা টানা হয়েছে। নিম্নতাপমাত্রায়, $C_p = C_v = C$, C_p ও C_v হচ্ছে যথাক্রমে স্থির চাপে ও স্থির আয়তনে তাপক্ষমতা। আর, Cকে (mJ/mole. deg^2 একক-এ) এইভাবে লেখা যায়

$$C = \left(\frac{125}{\Theta}\right)^3 T^3 + \gamma' T \qquad \dots (24)$$

Θ কেবলা হয় ডিবাই তাপমাত্রা (Debye Temperature), এই প্রকাশনের দক্ষিণ দিকে দুটো অংশ আছে। প্রথম অংশ$\left(\frac{125}{\Theta}\right)^3 T^3$কে বলা হয় জালিক তাপক্ষমতা Lattice heat capacity) এবং দ্বিতীয় অংশে $\gamma' T$কে বলা হয় ইলেকট্রনীয় তাপক্ষমতা (Electronic heat capacity)।

অতিপরিবাহীতার কারণ

দান্ত (Daunt) ও **মেণ্ডেলজোন্** (Mendelssohn) দেখিয়েছেন যে, IIনং তরল হিলিয়ামের অতি প্রবাহমানতার (superfluidity) ও ধাতুর অতি পরিবাহিতার মধ্যে গুণগত আশ্চর্য সাদৃশ্য লক্ষ্য করা যায়। উভয় ক্ষেত্রেই পরিবাহী কণাগুলির এক ধরণের মসৃণ গতিবিধি (Frictionless flow) লক্ষ্য করা যায়। কণাগুলির প্রবাহের দ্যুতি একটি সীমা অতিক্রম করলে এই মসৃণ-গতি নষ্ট হয়ে যায়। উভয়ক্ষেত্রেই আপেক্ষিক তাপের (specific heat) সম্পর্কে কিছুটা অসমাঞ্জস্য (anomaly) লক্ষ্য করা যায়। অবশ্য, এই বস্তুকণা একক্ষেত্রে হল ইলেকট্রন এবং অন্যক্ষেত্রে হল পরমাণু।

সম্ভবতঃ অতিপরিবাহী ধাতুর ইলেকট্রনদের মধ্যে দুরকম শ্রেণী আছে—সাধারণ শ্রেণীর ইলেকট্রন এবং অতিপরিবাহী শ্রেণীর ইলেকট্রন। এই দুই শ্রেণীর ইলেকট্রনের অনুপাত কিন্তু স্থির থাকে না, তাপমাত্রার পরিবর্তনের সাথে সাথে ঐ অনুপাতেরও পরিবর্তন হয়। যেমন, শূন্য ডিগ্রী কেল্ভিন তাপমাত্রায় ঐ অনুপাত হয় এক এবং পরিবর্তন তাপমাত্রায় (Transition temperature) ঐ অনুপাত হয় শূন্য।

এফ. লণ্ডন ও এইচ. লণ্ডন (F. London & H. London) অতিপরিবাহীতা সম্পর্কে একটি তত্ত্ব খাড়া করেছেন। তাঁরা কয়েকগুচ্ছ সমীকরণ তৈরী করতে পেরেছেন, সেগুলির সাহায্যে অতিপরিবাহীতার প্রকৃতি সম্পর্কে একটা স্থূল ধারণা করা যায়। তার পূর্বে, আমরা কোন তড়িৎপরিবাহীর তড়িৎ চুম্বকীয় প্রকৃতি সম্পর্কে সংক্ষেপে আলোচনা করব, যেভাবে বেকার (Becker) করেছেন। কোন আদর্শ তড়িৎপরিবাহীর (Perfect conductor) ক্ষেত্রে, তড়িৎক্ষেত্র $\mathbf{E}$ তে m ভর এবং e আধানসম্পন্ন একটি ইলেকট্রনের গতিসংক্রান্ত সমীকরণটি এরূপ হবে,

$$m\dot{\mathbf{V}} = e\mathbf{E} \quad \ldots \quad \ldots \quad (25),$$

এখানে $\dot{\mathbf{V}}$ হচ্ছে সময়ের সাথে বেগ $\mathbf{V}$ র ডেরিভেটিভ্।

এখন, তড়িৎপ্রবাহ ঘনত্ব **J** কে এভাবে লেখা যায়,

$\mathbf{J}=ne\mathbf{V}$, n হচ্ছে ইলেকট্রনগুলির সংখ্যা ঘনত্ব (number density)। কাজেই, (25) কে এইভাবে লেখা যায়,

$$\mathbf{E}=\left(\frac{4\pi\lambda^2}{c^2}\right)\dot{\mathbf{J}} \quad \ldots \quad \ldots \quad (26),$$

এখানে $$\lambda^2 \equiv \frac{mc^2}{4\pi ne^2} \quad \ldots \quad \ldots \quad (27)$$

এবং c হচ্ছে আলোকের বেগ।

λ হচ্ছে দৈর্ঘ্যমাত্রিক রাশি (parameter) এবং প্রতি পরমাণু পিছু একটি ইলেকট্রন এই হিসাবে ইলেকট্রনদের সংখ্যা ঘনত্ব (number density) ধরলে, λর মান 10^{-6} সে. মি.র মত হবে।

এখন, **ম্যাক্সওয়েল** (Maxwell) এর একটি তড়িৎ চুম্বকীয় সমীকরণ Curl $\mathbf{E}=\frac{-\dot{\mathbf{H}}}{C}$ ($\dot{\mathbf{H}}$ হচ্ছে সময়ের সাথে চুম্বকক্ষেত্র **H** এর ডেরিভেটিভ্) প্রয়োগ করে আমরা পাচ্ছি,

$$\left(\frac{4\pi\lambda^2}{c}\right) \text{Curl } \dot{\mathbf{J}}+\dot{\mathbf{H}}=0 \quad \ldots \quad \ldots \quad (28)$$

ম্যাক্সওয়েল এর অন্য একটি সমীকরণ Curl $\mathbf{H}=\frac{4\pi\mathbf{J}}{C}$ ব্যবহার করে পূর্ণ তড়িৎপরিবাহীর জন্য আমরা নিম্নলিখিত সমীকরণটি পাই,

$$\nabla^2\dot{\mathbf{H}}=\frac{\dot{\mathbf{H}}}{\lambda^2} \quad \ldots \quad \ldots \quad (29),$$

লাওয়ে (Laue) ১৯৪৯ সালে দেখিয়েছেন যে, যে কোন আকৃতির পরিবাহীর ক্ষেত্রে (29) নং সমীকরণটির সমাধান করে $\dot{\mathbf{H}}$ এর যে মান পাওয়া যায়, তা পরিবাহীটির উপরতল থেকে ভিতর দিকে প্রবেশ করে এক্সপোনেন্ট ভাবে কমতে থাকে। একটি প্রায় অসীম পাত আকৃতির পরিবাহীর ক্ষেত্রে, যা কিনা $x=0$ তল থেকে x দিকে প্রসারিত, (29) নং সমীকরণটির সমাধান হবে এইরূপ,

$$\dot{\mathbf{H}}(x)=\dot{\mathbf{H}}(0)e^{-x/\lambda} \quad \ldots \quad \ldots \quad (30)$$

স্পষ্টতঃই দেখা যাচ্ছে যে, যদি $x>>\lambda$ হয়, তাহলে $\dot{\mathbf{H}}(x)\simeq 0$ হবে। কাজেই, (30) নং সমীকরণটির সাহায্যে সুস্পষ্টভাবেই বোঝা যায় যে, কোন

আদর্শ পরিবাহীর ক্ষেত্রে কোন চুম্বকক্ষেত্রের মান সময়ের সাথে সাথে পরিবর্তিত হয় না।

কিন্তু **মাইসনার ও ওসেন ফিল্ড** (Meissner and Ochsen feld) ১৯৩৩ সালে পরীক্ষা নিরীক্ষা করতে করতে লক্ষ্য করলেন যে, অতি তড়িৎ পরিবাহীর অভ্যন্তরে তড়িৎ ক্ষেত্রের মান শূন্য হয়ে যায়। এই ঘটনার ফলে, **এফ্ লণ্ডন** এবং **এইচ্ লণ্ডন** ১৯৩৫ সালে ম্যাক্সওয়েল এর সমীকরণগুলির সাথে আরও দুটি তড়িৎচুম্বকীয় সম্পর্ক যুক্ত করলেন, যাতে কিনা অতি তড়িৎ পরিবাহীর তড়িৎচুম্বকীয় প্রকৃতি ব্যাখ্যা করা যায়। এই সম্পর্কগুলি হল,

$$\mathbf{E}=\frac{4\pi\lambda^2}{c^2\dot{\mathbf{J}}} \quad \ldots \quad \ldots \quad \text{(i)}$$

এবং $$\left(\frac{4\pi\lambda^2}{c}\right)\text{Curl } \mathbf{J}+\mathbf{H}=0 \quad \ldots \quad \ldots \quad \text{(ii)}$$

এখন ক্ষেত্র $\mathbf{H}$ এর পরিবর্তে এমন একটি ভেক্টর রাশি $\mathbf{A}$ বসান হল, যেন Curl $\mathbf{A}=\mathbf{H}$ হয় এবং সেইসঙ্গে div $\mathbf{A}=0$ হয় ; তখন (ii) নং সম্পর্কটি হল এরূপ

$$\frac{4\pi\lambda^2}{c}\,\mathbf{J}+\mathbf{A}=0 \quad \ldots \quad \ldots \quad \text{(iii)}$$

এখন, ম্যাক্সওয়েল এর সমীকরণ Curl $\mathbf{E}=-\dot{\mathbf{H}}/c$ প্রয়োগ করে এবং $\mathbf{E}=\left(\frac{4\pi\lambda^2}{c^2}\right)\dot{\mathbf{J}}$ এই সম্পর্কটি ব্যবহার করে পাওয়া যায়,

$$\nabla^2\mathbf{H}=\mathbf{H}/\lambda^2 \quad \ldots \quad \ldots \quad (31)$$

(31) নং সমীকরণ থেকে দেখা যায় যে, যে কোন আকৃতির পরিবাহীর ক্ষেত্রে, চুম্বকক্ষেত্র $\mathbf{H}$ কোন অতি তড়িৎ-পরিবাহীতে প্রবেশ করার পর এক্সপোনেন্টরূপে কমতে থাকে। পূর্বে যে প্রায় অসীম পাতের কথা উল্লেখ করা হয়েছে, তার ক্ষেত্রে (31) নং সমীকরণটির সমাধান এরূপ হবে,

$$\mathbf{H}(\mathrm{x})=\mathbf{H}(0)e^{-x/\lambda} \quad \ldots \quad \ldots \quad (32)$$

(32) নং সমীকরণ থেকে দেখা যায় যে, $x>>\lambda$ হলে, $\mathbf{H}(x)\simeq 0$ হবে, যা কিনা **মাইসনার প্রতিক্রিয়ার** সাথে মিলে যায়।

এটা স্পষ্ট যে, **লণ্ডন** সমীকরণ (i) ও (ii) থেকে এটা বোঝায় না যে, অতি তড়িৎপরিবাহীর অভ্যন্তর থেকে চুম্বকক্ষেত্র সম্পূর্ণরূপে অপসৃত হবে, বরঞ্চ,

(i) ও (ii) নং সমীকরণ থেকে আমরা দেখতে পাচ্ছি যে, চৌম্বক ক্ষেত্র অতি-পরিবাহীর উপর তল থেকে সামান্য ভিতরে প্রবেশ করবে এবং যত ভিতরের দিকে যাওয়া যায় ততই এক্সপোনেন্টরূপে (exponentially) কমতে থাকবে এবং চৌম্বক ক্ষেত্রটি বস্তুটির ভিতর দিকের দূরত্ব λ পর্যন্ত গিয়ে ক্ষেত্রটির প্রারম্ভিক মানের $1/e$ তম মানে পৌঁছাবে। এই দূরত্বকেই বলা হয় বিদ্ধ দূরত্ব।

কাজেই, অতিপরিবাহীর বৃহত্তর অংশের মধ্যে B ও H, উভয়েরই মান হবে শূন্য, যা পরীক্ষালব্ধ ফলাফলের সাথে মিলে যায়। (32) নং সমীকরণ থেকে দেখা যায় যে, অতি তড়িৎপ্রবাহ বস্তুর উপর তল থেকে সামান্য ভিতর পর্যন্তই যেতে পারে। বস্তুর প্রতি একক আয়তনে কতটা অতি তড়িৎপরিবাহী ইলেকট্রন থাকতে পারে, তার সম্বন্ধে একটা মোটামুটিভাবে যুক্তিসম্মত ধারণা করে দেখা যায় যে, λ দূরত্বর মান 10^{-5} সে. মি. থেকে 10^{-6} সে. মি.র মধ্যে সাধারণতঃ হয়।

অতিতড়িৎপ্রবাহ বস্তুর ভিতরে কতটা দূরত্ব পর্যন্ত প্রবেশ করতে পারে সে সম্পর্কে জানার জন্য মোটামুটিভাবে 10^{-5} সে. মি. থেকে 10^{-6} সে. মি. (অর্থাৎ λ র সমান পুরু) কোন অতি পরিবাহীর সূক্ষ্ম আস্তরণ (thin film) নিয়ে পরীক্ষা চালান হয়। **এ্যাপলইয়ার্ড, ব্রিসটাউ, লণ্ডন ও মাইসনার** (Appleyard, Bristow, London & Meissner) $\cdot 030\mu$ থেকে $1\cdot 088\mu$ পুরু পারদের সূক্ষ্ম আস্তরণ নিয়ে পরীক্ষা করে দেখেছিলেন যে, $2\cdot 5°$ কেলভিন তাপমাত্রায় λ র মান 10^{-5} সে. মি. এবং তাপমাত্রা যতই পরিবর্তন তাপমাত্রার (transition temperature) কাছাকাছি যেতে থাকে, ততই দ্রুত λ র মান বৃদ্ধি পেতে থাকে। **সোয়েনবার্গ, কাসিমির** (Casimir) প্রভৃতি বিজ্ঞানীরা পরীক্ষা করে অনুরূপ ফলাফল পেয়েছেন।

(26) নং সমীকরণটি সম্পর্কে এফ. লণ্ডন বলেছেন, '(26) নং সমীকরণটি শুধুমাত্র এইটুকু জানাচ্ছে যে, অতিপরিবাহীতে সেই সব তড়িৎপ্রবাহ ছাড়া অন্য কোন তড়িৎপ্রবাহ নেই, যেগুলি (28) নং সমীকরণ অনুসারে চৌম্বক ক্ষেত্র দ্বারা সৃষ্ট হয় এবং রক্ষিত হয়।' এর দ্বারা বোঝা যায় যে, তড়িৎবিভব (potential) দ্বারা সৃষ্ট কোন স্থির তড়িৎ ক্ষেত্র কোন অতিপরিবাহীতে থাকতে পারে না। আর, (26) নং সমীকরণ অনুসারে সৃষ্ট হয় এমন কোন তড়িৎপ্রবাহ অতি-পরিবাহীতে থাকতে পারে না, যদি না সেখানে সময়ের সাথে সাথে পরিবর্তনশীল চৌম্বকক্ষেত্র থাকে। লণ্ডনের তত্ত্বের সাহায্যে অতি তড়িৎপ্রবাহ ও সাধারণ তড়িৎ-প্রবাহের মধ্যে পার্থক্য বোঝা যায়। এফ্. লণ্ডন দেখিয়েছেন যে, একটি

অতি তড়িৎপরিবাহী একটি বৃহৎ ডায়াম্যাগনেটিক পরমাণুর ন্যায় ব্যবহার করে এবং কোন চৌম্বকক্ষেত্রে অতি তড়িৎপ্রবাহের ব্যবহার কোন ডায়াম্যাগনেটিক পরমাণুতে তড়িৎপ্রবাহের ব্যবহারের সমতুল্য—এটা ধরে নিয়ে (28) নং সমীকরণটি গঠন করা যেতে পারে।

অতি পরিবাহীতার শক্তি ফাঁক তত্ত্ব

লণ্ডনদের তত্ত্ব ছাড়াও আরও কয়েকটি তত্ত্ব আছে, যাদের সাহায্যে অতি-পরিবাহীতা ব্যাখ্যা করতে চেষ্টা করা হয়েছে, যেমন একটি হল **গর্টার ও কাসিমির** (Gorter & Casimir) এর দ্বি-প্রবাহ তত্ত্ব (Two-fluid model)। এই তত্ত্বে বলা হয়েছে যে, কোন অতিপরিবাহী পদার্থে মুক্ত ইলেকট্রনগুলি দুই শ্রেণীর হয়—সাধারণ তড়িৎপরিবাহী ইলেকট্রন ও অতি তড়িৎপরিবাহী ইলেকট্রন। তাপমাত্রা নেমে গেলে, সাধারণ ইলেকট্রনগুলি এক প্রকারের জমাট বাঁধে এবং অতিপরিবাহী হয়। এই অতিপরিবাহী ইলেকট্রনগুলির শক্তিকে বাড়িয়ে সাধারণ পরিবাহী ইলেকট্রনগুলির শক্তি স্তরে তুলতে তাপগ্রহণ করা প্রয়োজন হয়, অবশ্য কিছু তাপশোষিত হয়ে তাপমাত্রাও বৃদ্ধি করে।

কিন্তু লণ্ডন-তত্ত্ব বা দ্বিপ্রবাহ-তত্ত্ব কোনটাই অতিপরিবাহীতাকে সঠিকভাবে বোঝার পক্ষে যথেষ্ট নয়। **বার্ডিন, কুপার ও শৃফার** (Bardeen, Cooper & Schriffer) কোয়ান্টাম বলবিদ্যার উপর ভিত্তি করে যে তত্ত্ব ১৯৫৭ সালে প্রতিষ্ঠিত করেছেন, যা BCS তত্ত্ব নামে পরিচিত, তা অনেক বেশী সঠিক বলা যেতে পারে। এতে কেলাসজালিকের মধ্যে মুক্ত ইলেকট্রনের আচরণ আলোচিত হয়েছে।

যদি ফার্মি-ডিরাক সাংখ্যায়ন (Fermi-Dirac Statistics) অনুযায়ী ধাতুর মুক্ত ইলেকট্রনগুলিকে একটি আদর্শ গ্যাস হিসাবে ধরা হয়, তাহলে শুধু-মাত্র তাদের মধ্যে বিকর্ষণশক্তিকেই গণ্য করা হবে, কিন্তু কেলাস জালিকের ব্যবহারকে উপেক্ষা করা হবে।

কুপার দেখিয়েছেন যে, ধনাত্মক আয়নের কেলাস জালিকের মধ্যে একটি ইলেকট্রনের উপস্থিতি কেলাস জালিকের সামান্য বিকৃতি ঘটাতে পারে। তার ফলে, ধনাত্মক আয়নগুলি একদিকে জড়ো হতে পারে। এই ধনাত্মক আয়নগুলি

আবার আর একটি ইলেকট্রনকে আকর্ষণ করতে পারে। তখন, ইলেকট্রনগুলির মধ্যে আকর্ষণবল কমে যাবে। এখন, কেলাস জালিকের আকর্ষণশক্তি প্রায় 10^{-4} সে.মি. দূরত্ব পর্য্যন্ত ক্রিয়া করতে পারে। যাই হোক, কুপার দেখিয়েছেন যে, কোন কেলাস-জালিকের মধ্যে ইলেকট্রনদের মধ্যে আকর্ষণ ইলেকট্রন জোড় সৃষ্টি করতে পারে, যাদের বলা হয় **কুপার-জোড়** (Cooper pair)। এই ইলেকট্রন-জোড়গুলি স্পন্দনশীল কেলাস জালিকের সাথে শক্তি বিনিময় না করেই নিজেরা একত্রে যেতে পারে।

এখন, বার্ডিন, কুপার ও শৃফারের তত্ত্ব অনুযায়ী, যখন কোন অতি-পরিবাহীকে শক্তি প্রদান করা হয়, তখন কোন কোন ইলেকট্রন জোড়গুলি ভেঙে যায় এবং কোন ইলেকট্রনদ্বয় ও কুপার জোড়ের মধ্যে 2ϵ শক্তির ফাঁক থাকে। এখন, (24) নং প্রকাশনের সাহায্যে তত্ত্বগতভাবে ϵ কে কষে বের করা যায়। রঞ্জনরশ্মি ব্যবর্তন (X-ray diffraction) পদ্ধতিতে দেখা গিয়াছে যে, সাধারণ পরিবাহীতা অবস্থা থেকে অতিতড়িৎপরিবাহীতা অবস্থায় পরিবর্তনের ফলে ধাতুর কেলাস গঠনের কোন পরিবর্তন হয় না। কাজেই, ডিবাই তাপমাত্রা Θ উভয় ক্ষেত্রে একই থাকে। সুতরাং, ইলেকট্রনীয় তাপক্ষমতা C_{el} কে লেখা যায়,

$$C_{el} = C_s - \left(\frac{125}{\Theta}\right)^3 T^3,$$

কিন্তু (24) নং প্রকাশন থেকে ইলেকট্রনীয় তাপক্ষমতা হচ্ছে $\gamma' T$। এখন, $\log\left(\frac{C_{el}}{\gamma' T_c}\right)$ এবং T_c/Tর লেখচিত্র টেনে দেখা গিয়েছে যে, $\frac{C_{el}}{\gamma' T_c}$ কে মোটামুটিভাবে নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা প্রকাশ করা যায়,

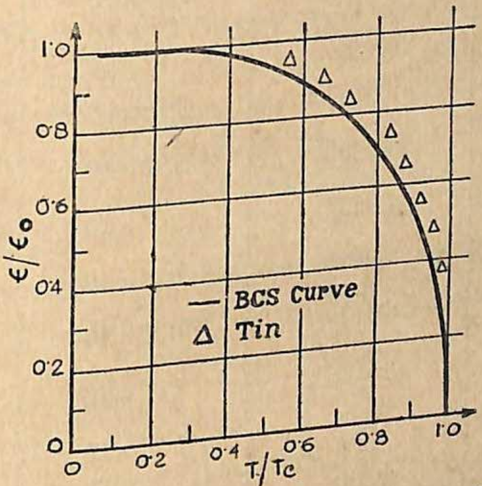
$$\frac{C_{el}}{\gamma' T_c} = a_e^{-bT_c/T} \quad \dots \text{(A)}$$

যদি BCS তত্ত্বের শক্তিফাঁক ϵ কে এই সমীকরণের অন্তর্ভুক্ত করা যায়, তাহলে আমরা পাই

$$\frac{\epsilon}{KT} = \frac{bT_c}{T}$$

$$\text{কাজেই,} \quad \frac{2\epsilon}{KT_c} = 2b$$

এই তত্ত্বগতভাবে প্রাপ্ত ϵ এর মানের কাছে পরীক্ষামূলক ভাবে প্রাপ্ত ϵ এর মানের যথেষ্ট নৈকট্য লক্ষ্য করা যায়। এই শক্তি পার্থক্য ϵ, তাপমাত্রার পরিবর্তনের সাথে সাথে পরিবর্তিত হয়। পরমশূন্য তাপমাত্রায় ϵ এর মানকে বলা হয় ϵ_0। T/T_c সাথে ϵ/ϵ_0 এর পরিবর্তন লেখচিত্রে দেখান হল।



৩৫নং চিত্র—টিনের ক্ষেত্রে T/T_cর সাথে ϵ/ϵ_0র পরিবর্তনের লেখচিত্র।

নিম্নতাপমাত্রায় পদার্থের আপেক্ষিক তাপ

তাপমাত্রা ক্রমান্বয়ে কমাতে থাকলে পদার্থের আপেক্ষিক তাপ কিভাবে হ্রাস পায় তা অত্যন্ত পুংখানুপুংখরূপে বিজ্ঞানীরা লক্ষ্য করেছেন ও নিখুঁত ভাবে পরিমাপ করেছেন। কারণ, এর সাহায্যে পদার্থের গঠন সম্পর্কে অনেক তথ্য জানা যায়।

পরীক্ষার ফলে দেখা গিয়েছে যে, যতই পরমশূন্য তাপমাত্রার দিকে যাওয়া যায়, কিছু কিছু ধাতুর স্থির আয়তনে আপেক্ষিক তাপ C_v ততই কমতে থাকে এবং অবশেষে প্রায় শূন্যের কাছাকাছি হয়। যেমন নিম্ন তাপমাত্রায় রূপার স্থির আয়তনে আপেক্ষিক তাপ C_vর পরিমাণ কিরূপ হয়, তা নীচের স্তম্ভলেখতে দেখান হল।

স্তম্ভলেখ ৮ঃ নিম্ন তাপমাত্রায় রূপার স্থির আয়তনে আপেক্ষিক তাপ C_v

তাপমাত্রা $K°$	স্থিরআয়তনে তাপক্ষমতা C_vর পরীক্ষামূলক মান	আইনস্টাইনের হিসাবে C_vর মান	ডিবাইএর হিসাবে C_vর মান
1·35	0·000254	$8·76 \times 10^{-49}$	—
2·0	0·000626	$1·39 \times 10^{-32}$	—
3·0	·00157	$6·16 \times 10^{-20}$	—
4·0	·00303	$5·92 \times 10^{-15}$	—
5·0	·00509	$1·62 \times 10^{-11}$	—
6.0	·00891	$3·24 \times 10^{-9}$	—
7·0	·0151	$1·30 \times 10^{-7}$	·0172
8·0	·0236	$2·00 \times 10^{-6}$	·0257
10	·0475	$1·27 \times 10^{-4}$	·0502
12	·0830	·0010	·0870
14	·1336	·0052	·137
16	·2020	·0180	·207
20	·3995	·0945	·394
28·56	1·027	·579	1·014
36·16	1·694	1·252	1·69
47·09	2·582	2·272	2·60
55·88	3·186	2·946	3·22
65·19	3·673	3·521	3·73
74·56	4·039	3·976	4·13
83·91	4·326	4·309	4·45
103·14	4·797	4·795	4·68
124·20	5·084	5·124	5·17

আইনষ্টাইনের হিসাব কোয়াণ্টাম্ বলবিদ্যা (Quantum Mechanics) সংক্রান্ত তত্ত্বের উপর ভিত্তি করে করা হয়েছে এবং তার জন্য যে সূত্র ব্যবহার করা হয়েছে তা হল, ... (33)

$$C_v = 3R.\ \frac{x^2 e^x}{(e^x - 1)^2}$$

প্রখানে, $x = h\nu/KT$, h হল প্লাঙ্কের ধ্রুবক (Planck's Constant) এবং ν হচ্ছে কোয়াণ্টাম্ স্পন্দন সংখ্যা (frequency), K হল বোলজ্‌ম্যানের ধ্রুবক। ৮নং স্তম্ভলেখতে দেখা যাচ্ছে যে, T-র মান খুব কম হলে, এই সূত্রের দ্বারা কষা হিসাবের সাথে পরীক্ষামূলক মানের মিল হচ্ছে না, যেমন, $14°K$ এ C_vর পরীক্ষামূলক মান আইন-ষ্টাইনের হিসাবে পাওয়া মানের থেকে বহু গুণ বড়। কিন্তু T বাড়লে বরং এদের মধ্যে অনেকটা মিল হচ্ছে। কারণ হচ্ছে, সমীকরণ (33) থেকে দেখা যাচ্ছে যে, T-র মান বেশী হলে $C_v = 3R$, যা কিনা ডুলঙ্ ও পেটিট্-এর সূত্র (Dulong-Petit law) অনুসারে পাওয়া যায়।

অন্যদিকে, ডিবাই যে সূত্র অনুসারে C_vর মান হিসাব করেছেন তা হল, ... (34)

$$C_v = 3R\left[\frac{12}{x^3}\int_0^x \frac{\xi^3\, d\xi}{e^{\xi} - 1} - \frac{3x}{e^{x-1}}\right]$$

এখানে $\xi = h\nu/KT$ এবং $\frac{\Theta}{T} = x$, Θ হল ডিবাই তাপমাত্রা। এখন, T বড় হলে, $C_v = 3R$, যা কিনা ডুলঙ্‌-পেটিট্ এর সূত্রের সাথে মিলে যায়।

কিন্তু খুব কম তাপমাত্রায়, অর্থাৎ T খুব ছোট হলে, x ও ξ খুব বড় হয়। ফলে, (34) নং সমীকরণটির চেহারা এরূপ হয়,

$$C_v = 3R.\ \frac{12}{x^3}\int_0^{\infty} \frac{\xi^3 d\xi}{e^{\xi} - 1}$$

$$= 3R.\ \frac{12\pi^4}{15}\left(\frac{T}{\Theta}\right)^3 = 77{\cdot}94 \times 3R.\left(\frac{T}{\Theta}\right)^3 \quad \dots (35)$$

যেহেতু, কোন বিশেষ পদার্থের ক্ষেত্রে R ও Θ ধ্রুবক, সেহেতু $C_v \propto T^3$; একে বলা হয় ডিবাই এর T^3 সূত্র।

৮নং স্তম্ভলেখতে দেখা যাচ্ছে যে, নিম্নতাপমাত্রায় ডিবাইর কষা হিসাব আইনষ্টাইনের কষা হিসাব থেকে অনেক বেশী পরীক্ষামূলক মানের সাথে মিলে যায়। ফেরোম্যাগনেটিক (Ferromagnetic) পদার্থগুলির, যেমন লোহা, নিকেল, কোবাল্ট প্রভৃতি ধাতুর ক্ষেত্রে লক্ষ্য করা হয়েছে যে, কুরী তাপমাত্রার

(যে তাপমাত্রায় ফেরোম্যাগনেটিক পদার্থগুলি প্যারাম্যাগনেটিক পদার্থে পরিণত হয়) কাছে এসে আপেক্ষিক তাপের ক্ষেত্রে একটি আকস্মিক পতন (sudden drop) ঘটে। যেমন নিকেলের ক্ষেত্রে কুরী তাপমাত্রা 358° সেণ্টিগ্রেডে এইরূপ ঘটনা ঘটে। কিন্তু নিম্নতাপমাত্রায় আপেক্ষিক তাপ ডিবাইর কষা হিসাব অনুষায়ী ঘটে থাকে।

এখন, ধাতুদের আপেক্ষিক তাপের কারণ দুটি—একটি হল ইলেকট্রনদের আপেক্ষিক তাপ এবং অন্যটি হল কেলাস জালিকের স্পন্দন। এই দুটি অংশকে যথাক্রমে αT এবং βT^3 এইভাবে প্রকাশ করা যায়। দেখা গিয়েছে যে সাধারণ বা উচ্চতাপমাত্রায় ইলেকট্রনীয় আপেক্ষিক তাপের অনুদান (contribution) মোট আপেক্ষিক তাপের অনুপাতে খুবই কম। কিন্তু নিম্নতাপমাত্রায় βT^3 অংশটি তাপমাত্রার হ্রাসের সাথে খুবই দ্রুত হ্রাস পেতে থাকে, ফলে ইলেকট্রনীয় আপেক্ষিক তাপ αT অংশটি প্রধান হয়ে ওঠে। রূপা, নিকেল প্রভৃতি ধাতু নিয়ে পর্যবেক্ষণ করতে গিয়ে খুবই স্পষ্টভাবে এটি বোঝা গিয়েছে।

আবার, অন্যান্য কয়েকটি কঠিন পদার্থের (ধাতু নয়) ক্ষেত্রে আপেক্ষিক তাপের একটি বৈশিষ্ট্য লক্ষ্য করা যায়। যেমন, কঠিন মিথেনের বেলায় দেখা গিয়েছে যে 20·4° কেলভিন তাপমাত্রায় আপেক্ষিক তাপের মানে বিরাট উল্লম্ফন (Jump) ঘটে। কিন্তু ঐ তাপমাত্রার নিম্নদিকে ও ঊর্ধদিকে আপেক্ষিক তাপের মান অনেক কম। এরূপ ঘটনা কঠিন অক্সিজেন, কঠিন নাইট্রোজেন, কঠিন কার্বন-ডাইঅক্সাইডে, কঠিন এ্যামোনিয়াম ক্লোরাইড, হাইড্রোজেন ক্লোরাইড প্রভৃতির ক্ষেত্রেও লক্ষ্য করা গিয়েছে।

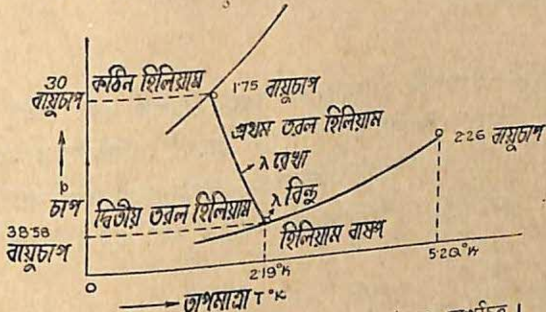
অতিতড়িৎ পরিবাহীদের আপেক্ষিক তাপ সম্পর্কে পূর্বেই আলোচিত হয়েছে।

তরল হিলিয়ামের অতিপ্রবাহতা

নিম্ন তাপমাত্রায় পদার্থের যেসব বৈশিষ্ট্য লক্ষ্য করা যায়, তার মধ্যে যেটি অত্যন্ত কৌতূহলদ্দীপক সেটি হল তরল হিলিয়ামের একটি বিচিত্র ধর্ম অতিপ্রবাহতা। সে সম্পর্কে এখন আমরা আলোচনা করব।

কামেরলিঙ্ ওনেস্ হিলিয়ামকে তরলায়িত করতে সমর্থ হয়েছিলেন, কিন্তু তিনি হিলিয়ামকে কঠিনে পরিণত করতে পারেন নাই। তাঁর ছাত্র কীজম্ হিলিয়ামকে কঠিনে পরিণত করতে সমর্থ হন। তিনি হিলিয়ামের

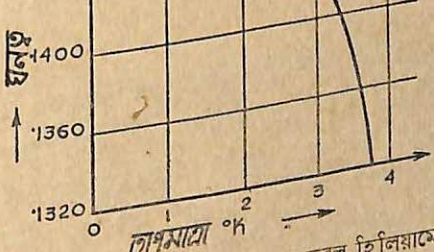
কঠিনীভবনের লেখচিত্র টানতে সমর্থ হন, যা নীচের ৩৬নং লেখচিত্রে দেখান হয়েছে। যে বিশেষ চাপ ও তাপমাত্রায় কঠিন হিলিয়াম তরল হিলিয়ামের সাথে সাম্য অবস্থায় থাকে, তা ঐ লেখচিত্রে দেখা যাচ্ছে।



৩৬ নং চিত্র—হিলিয়ামের অবস্থা পরিবর্তনের লেখচিত্র।

এটা কৌতূহলদ্দীপক যে, পরমশূন্য তাপমাত্রা (0° কেলভিন) পর্যন্তও হিলিয়ামের গ্যাসীয় এবং তরল অবস্থা সাম্যভাবে থাকে অর্থাৎ কিনা কঠিন, তরল ও গ্যাসীয় হিলিয়াম—এই তিনটিঅবস্থা কখনও একত্রে দেখতে পাওয়া যাবে না।

উপরের লেখচিত্রে দেখা যাচ্ছে, I নং তরল হিলিয়াম ও II নং তরল হিলিয়াম λ রেখার দুই বিপরীত পার্শ্বে আছে। এখন প্রশ্ন হতে পারে

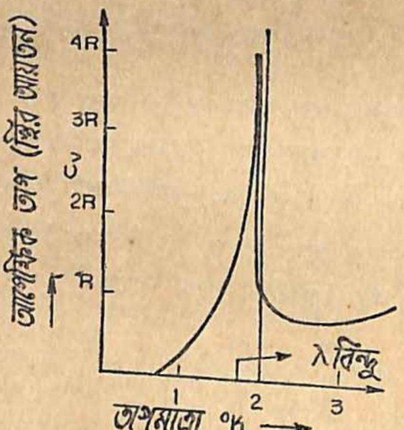


৩৭ নং চিত্র—তাপমাত্রার সাথে সাথে তরল হিলিয়ামের ঘনত্বের পরির্তনের লেখচিত্র।

λ রেখা কি ? I নং ও II নং তরল হিলিয়ামই বা কি ? ব্যাপারটা ব্যাখ্যা করা প্রয়োজন। তরল হিলিয়াম নিয়ে পরীক্ষা নিরীক্ষা করতে করতে

কামেরলিঙ্ ওনেস্ ১৯২২ সালে দেখলেন যে, তরল হিলিয়ামের তাপমাত্রা কমাতে থাকলে 2.19° কেলভিন তাপমাত্রা পর্য্যন্ত তার ঘনত্ব বাড়তে থাকে, কিন্তু 2.19° কেলভিনের নীচে আবার ঘনত্ব কমতে থাকে। পূর্বপৃষ্ঠার ছবিতে বিষয়টি পরিষ্কার হবে।

এই 2.19° কেলভিন তাপমাত্রাটির আরও বৈশিষ্ট্য দেখা গেল। কীজম্ দেখলেন যে, তরল হিলিয়ামের আপেক্ষিক তাপের পরিবর্তনের মধ্যেও একটি ছেদ (discontinuity) 2.19° কেলভিন তাপমাত্রাতে লক্ষ্য করা যায় (চিত্র নং ৩৮)। এই 2.19° কেলভিন তাপমাত্রাকে বলা হয় λ বিন্দু (λ point),



৩৮ নং চিত্র—বিভিন্ন তাপমাত্রায় তরল হিলিয়ামের আপেক্ষিক তাপ।

কারণ লেখচিত্রের চেহারা অনেকটা গ্রীক অক্ষের লাম্‌ডা λর মত। যতক্ষণ তরল হিলিয়ামকে দ্রুত পাম্প করে বাষ্পায়িত করা হয়, ততক্ষণ এটি ভীষণভাবে ফুটতে থাকে এবং ঠাণ্ডা হতে থাকে। কিন্তু যেইমাত্র λ তাপমাত্রায় পৌঁছান যায়, তরল হিলিয়ামের স্ফুটন বন্ধ হয়ে যায় এবং শান্তভাব ধারণ করে। এর ফলেই ধারণা করা হয় যে λ বিন্দুর নীচে তরল হিলিয়ামের এক নূতন রূপ দেখা দেয়, যাকে বলা হয় II নং তরল হিলিয়াম। কীজম্ ও ক্লসিয়াস্ (clausius) তরল হিলিয়ামের তাপমাত্রা ক্রমাগত কমিয়ে এবং সঠিকভাবে চাপের সামঞ্জস্যে বিধান করে তরল হিলিয়ামের চাপ-তাপমাত্রা রেখা পেয়েছিলেন। একেই নাম দেওয়া হয়েছে λ রেখা। এই রেখাটি যেখানে

I নং তরল হিলিয়াম—কঠিন হিলিয়াম রেখাকে ছেদ করেছে (তাপমাত্রা 1.75° কেলভিন) সেই বিন্দুটি একটি ত্রৈধবিন্দু (Triple point), যেখানে কঠিন হিলিয়াম, I নং তরল হিলিয়াম এবং II নং তরল হিলিয়াম একত্রে থাকতে পারে।

II নং তরল হিলিয়াম যা λ বিন্দুর নীচে পাওয়া যায়, তা I নং তরল হিলিয়াম থেকে অনেক বেশী সুশৃংখল অবস্থায় থাকে। ডানা (Dana) ও কামেরলিঙ্ ওনেস্ দেখিয়েছেন যে, তরল হিলিয়ামের বাষ্পীভবনের লীনতাপ λ বিন্দুতে কোনরূপ অস্বাভাবিকতা দেখায় না। এসব থেকে বোঝা যায় যে, λ-পরিবর্তন প্রথম শ্রেণীর (first order) দশান্তর (Phase transition) নয়, বরং একে দ্বিতীয় শ্রেণীর (second order) দশান্তর বলা যায়।

এ বিষয়টি অত্যন্ত কৌতুহলদ্দীপক বলে এটি সংক্ষেপে আলোচিত হচ্ছে। দ্বিতীয় শ্রেণীর দশান্তরের (Phase transition) বৈশিষ্ট্য হল এই যে, এখানে চাপ ও তাপমাত্রা স্থির থাকে এবং এনট্রপি ও আয়তনের কোনরূপ পরিবর্তন হয় না, যা কিনা প্রথম শ্রেণীর দশান্তরে হয়। এখানে শুধুমাত্র গিবস্ অপেক্ষক এর (Gibbs function) দ্বিতীয় পর্যায়ের ডেরিভেটিভ্ (Second derevative) এর ছেদযুক্ত পরিবর্তন লক্ষ্য করা যায়, যেখানে কিনা প্রথম শ্রেণীর দশান্তরের ক্ষেত্রে গিবস্ অপক্ষক এর প্রথম পর্যায়ের ডেরিভেটিভ্ (first order derivative) এর ছেদযুক্ত পরিবর্তন লক্ষিত হয়।

গাণিতীক সূত্রে বিষয়টি এইভাবে প্রকাশ করা যায়। প্রথম পর্যায়ের অবস্থান্তরের ক্ষেত্রে,

$$\left.\begin{aligned} g_2 - g_1 &= 0 \\ -\left(\frac{\partial g_2}{\partial T}\right)_p + \left(\frac{\partial g_1}{\partial T}\right)_p &= S_2 - S_1 = \frac{L}{T} \\ \left(\frac{\partial g_2}{\partial p}\right)_T - \left(\frac{\partial g_1}{\partial p}\right)_T &= v_2 - v_1 \end{aligned}\right\} \text{ তাপগতিতত্ব অনুসারে}$$

এখানে, g_1 ও g_2 হল দুটি দশায় গিবস্ অপেক্ষকের মান, $\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p$ ও $\left(\frac{\partial g}{\partial p}\right)_T$ হল যথাক্রমে স্থির চাপে ও স্থির তাপমাত্রায় গিবস্ অপেক্ষকের প্রথম পর্যায়ের ডেরিভেটিভ্; S_1, S_2 হল দুটি দশায় এনট্রপির মান; v_1, v_2 হল দুটি দশায় আয়তন এবং L হল দশান্তরের লীনতাপ। T হচ্ছে পরম তাপমাত্রা।

কিন্তু দ্বিতীয় শ্রেণীর দশান্তরের ক্ষেত্রে

$$g_2 - g_1 = 0$$

$$-\left(\frac{\partial g_2}{\partial T}\right)_p + \left(\frac{\partial g_1}{\partial T}\right)_p = S_2 - S_1 = 0$$

এবং $\left(\frac{\partial g_2}{\partial p}\right)_T - \left(\frac{\partial g_1}{\partial p}\right)_T = v_2 - v_1 = 0$

আবার, যেহেতু

তাপগতিতত্ব অনুযায়ী, $\left(\frac{C_p}{T}\right) = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p = \frac{\partial}{\partial T}\left[-\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p\right]_p$

$$= -\left(\frac{\partial^2 g}{\partial T^2}\right)_p$$

$$kv = -\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T = -\frac{\partial}{\partial p}\left[\left(\frac{\partial g}{\partial p}\right)_T\right]_T = -\left(\frac{\partial^2 g}{\partial p^2}\right)_T$$

$$\alpha v = \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{\partial}{\partial T}\left[\left(\frac{\partial g}{\partial p}\right)_T\right]_p = \frac{\partial^2 g}{\partial T \partial p}$$

এখানে, C_p = স্থির চাপে আপেক্ষিক তাপ

k = সমতাপ সংনমন্যতা (Isothermal Compressibility)

α = আয়তন প্রসারাঙ্ক (Coefficient of volume expension)

আবার, $\left(\frac{\partial^2 g_2}{\partial T^2}\right)_p - \left(\frac{\partial^2 g_1}{\partial T^2}\right)_p = \frac{Cp_1}{T} - \frac{Cp_2}{T}$

$$\left(\frac{\partial^2 g_2}{\partial p^2}\right)_T - \left(\frac{\partial^2 g_1}{\partial p^2}\right)_T = v(k_1 - k_2)$$

$$\frac{\partial^2 g_2}{\partial T \partial p} - \frac{\partial^2 g_1}{\partial T \partial p} = v(\alpha_2 - \alpha_2)$$

এখন, যেহেতু দ্বিতীয় শ্রেণীর রূপান্তরে এনট্রপির পরিবর্তন ঘটে না, $S_1 = S_2$, তাপমাত্রা T ও চাপ p তে এবং $S_1 + ds_1 = S_2 + ds_2$, তাপমাত্রা $T + dT$ ও চাপ $p + dp$ তে।

সুতরাং $ds_1 = ds_2$

কিন্তু $ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T dp$

$$= \frac{Cp}{T} dT - \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dp.$$

কাজেই, $$\frac{Cp_1}{T}dT - v\,\alpha_1\,dp$$
$$= \frac{Cp_2}{T}dT - v\,\alpha_2\,dp,$$

যেহেতু v উভয় দশাতেই এক। কাজেই,

$$\frac{dp}{dT} = \frac{Cp_2 - Cp_1}{Tv(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad \ldots \quad (36)$$

অনুরূপভাবে, যদি আমরা ধরে নেই

$$v_1 = v_2,$$

তাহলে, $dv_1 = dv_2$

কিন্তু dv কে এইভাবে লেখা যায়,

$$dv = \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T dp$$

সুতরাং, $v\,\alpha_1\,dT - v\,k_1\,dp$
$$= v\,\alpha_2\,dT - v\,k_2\,dp$$

অর্থাৎ কিনা, $$\frac{dp}{dT} = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{k_2 - k_1} \quad \ldots \quad (37)$$

এ দুটি সমীকরণকে এরেনফেষ্ট এর সমীকরণ (Ehrenfest's equation) বলে।

ডানা (Dana) ও কামেরলিঙ্ ওনেস্ দেখিয়েছেন যে, 2·19° K তাপমাত্রায় তরল হিলিয়ামের লীন তাপের মানে কোন আকস্মিক পরিবর্তন দেখা যায় না, কিন্তু আপেক্ষিক তাপ এবং তাপ প্রসারণগুণাঙ্ক α_s হিলিয়ামের সংপৃক্ত বাষ্পচাপে ছেদপূর্ণভাবে (discontinously) পরিবর্তিত হয়। কাজেই, λ পরিবর্তনটি দ্বিতীয় শ্রেণীর দেশান্তর।

এখন, *He* I এবং *He* II র ক্ষেত্রে পরীক্ষামূলক ফলাফল থেকে পাওয়া যায়,

$Cp_1 =$ 1·2
$Cp_2 =$ 2·9 ক্যালরি/গ্রাম. ডিগ্রী
$\alpha_1 =$ ·02
$\alpha_2 = -0·04$/ডিগ্রী
$v_1 = v_2 = 6·84$ সেমি^{3}/গ্রাম,
$T = 2·19°$ K

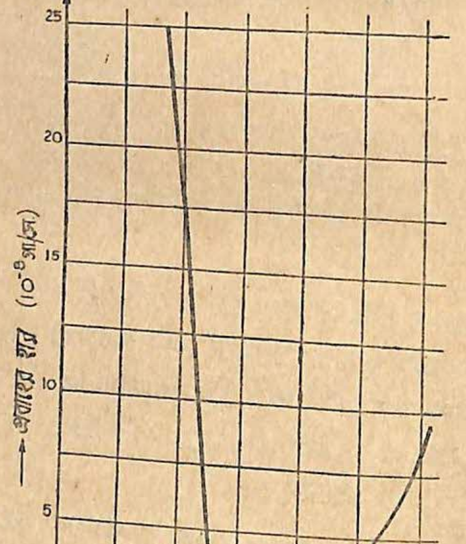
কাজেই, (37) নং সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{dp}{dT} - 78 \text{ বায়ুচাপ/ডিগ্রী}$$

এই মান পরীক্ষাকার্যের ফলে প্রাপ্ত মান −81·9 বায়ুচাপ / ডিগ্রীর খুবই কাছাকাছি।

II নং তরল হিলিয়ামের অতিপ্রবাহতা

II নং তরল হিলিয়ামের সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ ধর্ম হল এটি অস্বাভাবিক কম সান্দ্র (viscous)। পয়স্যুলির (Poiseuille) সূত্র অনুসারে, কোন নলের মধ্য দিয়ে বা সরু পথের মধ্য দিয়ে কোন তরলের প্রবাহের হার ঐ তরলের সান্দ্রতা ধর্মের সাথে ব্যস্ত অনুপাতী। যদি একটি সরুপথের মধ্য দিয়ে



৩৯ নং চিত্র—তাপমাত্রার সাথে হিলিয়ামের প্রবাহের হারের লেখচিত্র।

তাপমাত্রার সাথে তরল হিলিয়ামের প্রবাহের হার মাপা যায়, তাহলে ৩৯নং লেখচিত্রটি পাওয়া যাবে। λ বিন্দুতে প্রবাহের হার অস্বাভাবিকভাবে বেড়ে

যায় এবং অত্যন্ত কম সান্দ্রতার প্রমাণ দেয়। আরও লক্ষ্য করা গিয়েছে যে যদি কোন ছোট পাত্রের তলদেশ II নং তরল হিলিয়ামের মধ্যে ধীরে ধীরে ডুবিয়ে দেওয়া হয়, তাহলে দেখা যায় যে II নং তরল হিলিয়াম পাত্রটির গা বেয়ে উঠে পাত্রটি পূর্ণ করে দিচ্ছে। আরও লক্ষ্য করা গিয়েছে যে, যদি কোন পাত্রের তলদেশ II নং তরল হিলিয়ামের মধ্যে ধীরে ধীরে ডুবিয়ে দেওয়া হয়, তাহলে দেখা যায় যে, II নং তরল হিলিয়াম পাত্রটির গা বেয়ে উঠে পাত্রটিকে পূর্ণ করে দিচ্ছে। লাণ্ডাউ (Landau) ১৯৪১ সালে II নং তরল হিলিয়ামের এইরূপ অদ্ভুৎ আচরণকে ব্যাখ্যা করার জন্য একটি তত্ত্ব খাড়া করেছিলেন। তাঁর মতে II নং তরল হিলিয়ামের শক্তিস্তরগুলির (Energy levels) মধ্যে দুইপ্রকার অবিচ্ছিন্ন শক্তি ধাপ (Energy states) আছে—একপ্রকারের শক্তি ধাপ শব্দের কোয়াণ্টার জন্য, যাদের বলা হয় ফোনন (Phonon) এবং আর একপ্রকারের শক্তিধাপ শীর্ষগতির (vortex motion) কোয়াণ্টার জন্য, যাদের বলা হয় রোটন (Roton)। এই দুই প্রকারের কোয়াণ্টার শক্তি ধাপগুলি একে অন্যের উপর অনেকাংশে জুড়ে রয়েছে। ফোনন্ কোয়াণ্টার সর্বনিম্ন শক্তিধাপটি রোটন কোয়াণ্টার সর্বনিম্ন শক্তি ধাপের তলায় রয়েছে। এই অনুমানের উপর ভিত্তি করে লাণ্ডাউ একটি কোয়াণ্টাম তরল গতিবিদ্যা (Quantum hydro dynamics) গড়ে তুলেছিলেন, যার সাহায্যে II নং তরল হিলিয়ামের অনেক ধর্মই ব্যাখ্যা করা যায়।

এফ্ লণ্ডন কোয়াণ্টাম সমষ্টিবিদ্যা (Quantum statistical mechanics) উপর ভিত্তি করে একটি তত্ত্ব গড়ে তুলেছিলেন। এই তত্ত্বে λ বিন্দুতে I নং তরল হিলিয়াম থেকে II নং তরল হিলিয়ামের পরিবর্তনকে একটি বিশেষ প্রকারের কোয়াণ্টাম ঘনীভবন (Quantum condensation) মনে করা হয়, যার নাম দেওয়া হয় বোস্-আইনষ্টাইন ঘনীভবন (Bose-Einstein condensation)। এই প্রকারের ঘনীভবন সাধারণ ঘনীভবনের মত নয়, একে বলা হয় কোয়াণ্টাম স্থানে (Quantum space) ঘনীভবন। এই বোস-আইনষ্টাইন ঘনীভবন তত্ত্ব ফাইনম্যানের (Feynmann) তত্ত্বীয় গবেষণা দ্বারাও সমর্থিত হয়েছে।

লাণ্ডাউ ও লণ্ডনের যুক্তিগুলি আবার টিজার (Tisza) দ্বি-প্রবাহ (Two fluied model) চিত্র দ্বারা মোটামুটিভাবে সমর্থিত হয়। টিজার তত্ত্বটি সরল এবং তা অতিপ্রবাহতা বোঝার পক্ষে খুবই সাহায্যকারী। এই চিত্র অনুযায়ী, II নং তরল হিলিয়াম দুই প্রকারের হিলিয়ামের মিশ্রণ, এক প্রকারের হিলিয়াম

সাধারণ পরমাণু দ্বারা গঠিত, যাদের সান্দ্রতা ধর্ম সাধারণ এবং অন্য প্রকারের হিলিয়াম অতি প্রবাহধর্মী পরমাণু দ্বারা গঠিত যারা সাধারণ পরমাণুর মধ্য দিয়ে যাবার সময় কোনরূপ ঘর্ষণ অনুভব করে না। এরূপ ধারণা করা হয় যে, অতিপ্রবাহধর্মী হিলিয়ামের পরমাণুগুলি সাধারণ হিলিয়ামের পরমাণুগুলির সাথে বা পাত্রতলের সাথে ভ্রামক বিনিময় করে না। এই ধারণা দিয়ে সরুনল ইত্যাদির মধ্য দিয়ে হিলিয়ামের বিচিত্র প্রবাহকে এবং হিলিয়ামের অদ্ভুৎ সান্দ্রতাকে ব্যাখ্যা করা যায়। যখন II নং তরল হিলিয়াম নল দিয়ে প্রবাহিত হয়, তখম শুধুমাত্র সাধারণ তরল হিলিয়ামের সান্দ্রতা দেখা দেয়। কারণ অতিপ্রবাহধর্মী তরলটির $\eta=0$. যখন II নং তরল হিলিয়াম খুব সূক্ষ্ম কৈশিক নল দিয়ে প্রবাহিত হয়, তখন শুধুমাত্র অতিপ্রবাহধর্মী তরলটি বের হয়ে আসে এবং সাধারণ তরলটি নলের দেওয়ালে স্থির হয়ে আটকে যায়। যদি II নং তরল হিলিয়ামের ঘনত্ব হয় ρ, তাহলে

$$\rho=\rho_n+\rho_s$$

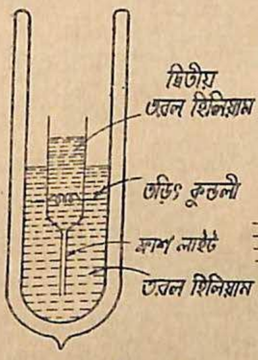
এখানে ρ_n হচ্ছে II নং তরল হিলিয়ামের সাধারণ অংশের ঘনত্ব এবং ρ_s হচ্ছে ঐটির অতি প্রবাহধর্মী অংশের ঘনত্ব। λ বিন্দুতে, সব পরমানুগুলিই সাধারণ, সেইজন্য $\rho_n/\rho=1$; আবার, পরমশূন্য তাপমাত্রায় সব পরমাণুই অতি প্রবাহধর্মী, যার ফলে তখন, $\rho_n/\rho=0$।

ঝরণা প্রতিক্রিয়া

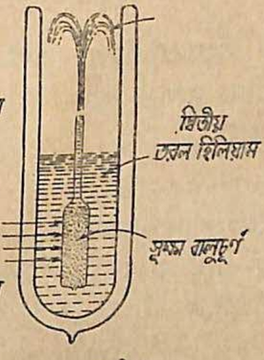
II নং তরল হিলিয়ামের একটি অন্যতম বিচিত্র ধর্ম হল ঝরণা প্রতিক্রিয়া, যেটি **এ্যালেন ও জোনস্** (Allen and Jones) ১৯৩৮ সালে আবিষ্কার করেন। তাঁরা দেখালেন যে, যদি কোন পাত্রের মধ্যে II নং তরল হিলিয়াম এমনভাবে রাখা হয় যেন সেটি একটি খুব সরু নলের সাহায্যে বাইরের II নং তরল হিলিয়ামের কুণ্ডের সাথে সংযোগ রক্ষা করতে পারে এবং যদি তড়িৎ প্রবাহের সাহায্যে ঐ পাত্রস্থ তরল হিলিয়ামকে উত্তপ্ত করা হয়, তবে পাত্রের II নং তরল হিলিয়ামের উচ্চতা পাশের কুণ্ডের II নং তরল হিলিয়ামের উচ্চতার থেকেও বেশী হবে। ৪০ নং ছবিতে বিষয়টি পরিষ্কার হবে।

৪১ নং চিত্রতে বিষয়টি আরও ভাল করে বোঝা যাচ্ছে। খুব সূক্ষ্ম চূর্ণের মধ্যে ধরা হিলিয়ামকে একটি ফ্লাশলাইটের আলোর বিকীরণের সাহায্যে উত্তপ্ত

করা হলে দেখা যায় যে, চাপের বৃদ্ধির ফলে তরল হিলিয়ামের ঝরণা সৃষ্টি হয়, যা কিনা 30 সে. মি. পর্য্যন্ত উঁচু হতেও দেখা যায়।



৪০ নং চিত্র



৪১ নং চিত্র

যদি দুটি কক্ষে বা কোন পাত্রের দুটি অংশের মধ্যে কোন সূক্ষ্ম নল বা সরু পথের সাহায্যে যোগাযোগ থাকে এবং একটি অংশে রক্ষিত II নং তরল হিলিয়ামের তাপমাত্রা ও চাপ যথাক্রমে T_1 ও P_1 হয় এবং অপর অংশের II নং তরল হিলিয়ামের তাপমাত্রা ও চাপ যথাক্রমে T_2 ও P_2 হয়, তাহলে $T_2 > T_1$ হলে $P_2 > P_1$ হবে। তাপের পার্থক্য চাপেরও পার্থক্য সৃষ্টি করবে, যার ফলে তরল হিলিয়ামের প্রবাহ হবে। এর ফলে যে ঝরণা প্রতিক্রিয়া সৃষ্টি হবে, তার পরিমাপ f এইভাবে লেখা যায়

$$f = \frac{P_2 - P_1}{T_2 - T_1} \qquad \ldots (38)$$

বা $f = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_g$ ...(38), g হল গিবস্ অপেক্ষক (Gibb's function)।

যখন IIনং তরল হিলিয়াম কোন সরু পথ, ছিদ্র বা সরু নল দিয়ে যায় তখন, অনুমান করা হয়, যে শুধুমাত্র অতিপ্রবাহধর্মী পরমাণুগুলিই প্রবাহিত হয়। এদের শক্তি ও এনট্রপি (entropy) হচ্ছে যথাক্রমে শূন্যবিন্দুশক্তি ও শূন্যবিন্দু এনট্রপি। যদি আমরা ধরে নিই যে, পরমশূন্য তাপমাত্রায় এনট্রপি শূন্য হবে, তাহলে যেহেতু, পরমশূন্য তাপমাত্রায় IIনং তরল হিলিয়াম শুধুমাত্র অতিপ্রবাহধর্মী পরমাণু দিয়েই গঠিত, এই অতিপ্রবাহধর্মী পরমাণুগুলির এনট্রপিকে শূন্য হিসাবে ধরা যায়। কাজেই, যখন IIনং তরল হিলিয়াম কোন সরু পথের মধ্য দিয়ে যায়,

তখন কোন এনট্রপির হ্রাস পায় না। এখন, তাপগতিবিদ্যার আলোচনা থেকে দেখান যায় যে,

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_g = \frac{S}{v} \quad \dots (39)$$

একে বলা হয় ঝরণা-প্রতিক্রিয়া সমীকরণ, S হচ্ছে সমগ্র তন্ত্রটির এনট্রপি, v হচ্ছে আপেক্ষিক আয়তন (specific volume)। যদি হিলিয়াম ঝরণার উচ্চতাহয় y, তাহলে

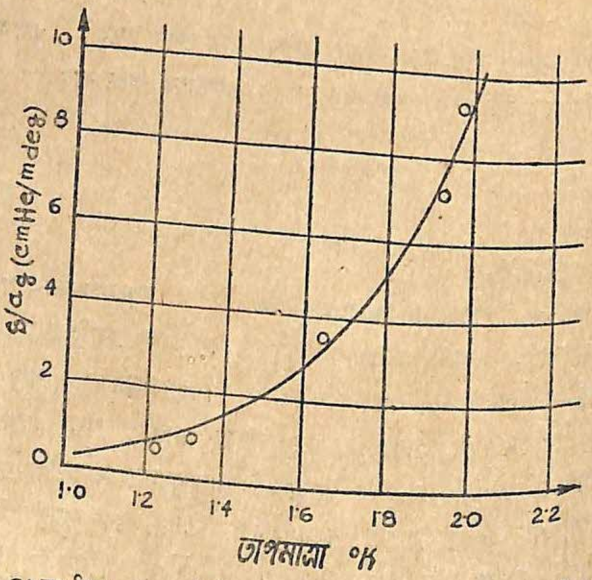
$$P = y\rho a_g$$

এখানে a_g হচ্ছে মাধ্যাকর্ষণজনিত ত্বরণ এবং ρ হচ্ছে হিলিয়ামের ঘনত্ব এবং P হচ্ছে চাপ, যা সেন্টিমিটারে প্রকাশ করা হয়। সেক্ষেত্রে, ঝরণা প্রতিক্রিয়া সমীকরণকে এইভাবে লেখা যায়,

$$\left(\frac{\partial y}{\partial T}\right)_g = \frac{S}{v\rho a_g} \quad \dots (40)$$

এনট্রপি Sকে আপেক্ষিক তাপ থেকে হিসাব করে বের করা যেতে পারে। কারণ, $S = \int_0^T C\frac{dT}{T}$, C হল আপেক্ষিক তাপ।

নীচে ঝরণা প্রতিক্রিয়ার পরীক্ষামূলক ফলাফল লেখচিত্রের সাহায্যে দেখান হল।

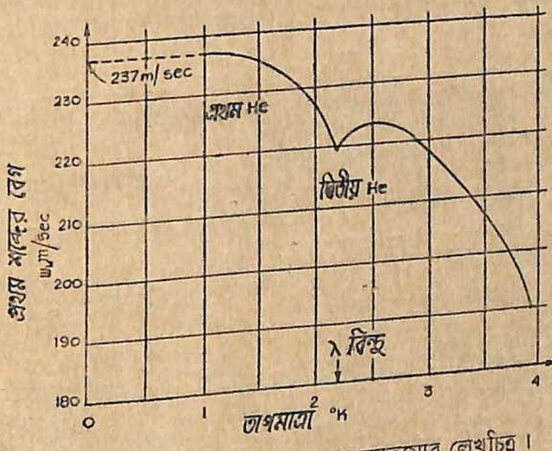


৪২নং চিত্র—ঝরণাপ্রতিক্রিয়ার পরীক্ষামূলক ফলাফলের লেখচিত্র।

দ্বিতীয় শব্দ

IIনং তরল হিলিয়ামের দ্বিপ্রবাহ তত্ত্ব অনুসারে সাধারণ পরমাণুগুলির ও অতিপ্রবাহধর্মী পরমাণুগুলির অনুপাত তাপমাত্রার উপর খুব বেশী নির্ভর করে। যদি আঞ্চলিক ভাবে কোন অংশে দ্রুত তাপমাত্রার তারতম্য ঘটে, তাহলে দ্রুত সেই অংশে ρ_n/ρ_s অনুপাতেরও তারতম্য হয়, যদিও সামগ্রিকভাবে $\rho_n+\rho_s=\rho$ এর পরিবর্তন হয় না। মাধ্যমের সমগ্র অংশে ঘনত্ব ρর তারতম্য প্রবাহিত হলে সাধারণ অণুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের সৃষ্টি হয়, যাকে বলা হয় প্রথম শব্দ (First sound)। টিজা ও লাণ্ডাউ আর এক প্রকার তরঙ্গের সৃষ্টির কথা তত্ত্বগতভাবে বলেন, যাতে ρ_n/ρ_s এই অনুপাতটির তারতম্য হয়, কিন্তু সামগ্রিকভাবে ρর পরিবর্তন ঘটে না। একে বলা হয় দ্বিতীয় শব্দ। এই দ্বিতীয় শব্দকে প্রথম শব্দের সাথে তুলনা করলে দেখা যায় যে, প্রথম শব্দে স্বাভাবিক ও অতিপ্রবাহধর্মী উভয় প্রকার পরমাণুরই স্পন্দন একত্রে সঞ্চারিত হয়। আর দ্বিতীয় শব্দে, স্বাভাবিক ও অতিপ্রবাহধর্মী পরমাণুর স্পন্দন পরস্পরের সাথে আপেক্ষিকভাবে সঞ্চারিত হয়।

IIনং তরল হিলিয়ামে একটি সঞ্চরণশীল পিষ্টনের সাহায্যে প্রথম শব্দ সৃষ্টি করা যায় এবং এই শব্দ সৃষ্ট হবার পর পদার্থবিজ্ঞানের ধ্রুপদী সূত্রাবলী অনুসারে ω_1 বেগে প্রবাহিত হয়, কেবলমাত্র এর ক্ষেত্রে সংনমন ও প্রসারণের মধ্যে কোন তাপমাত্রার তারতম্য হয় না এবং $\gamma=1$ ধরা হয়। নীচে লেখচিত্রে তাপমাত্রার সাথে ω_1 এর তারতম্য দেখান হয়েছে।



৪৩নং চিত্র—তাপমাত্রার সাথে ω_1র তারতম্যের লেখচিত্র।

তাপমাত্রার তারতম্যের দ্বারা দ্বিতীয় শব্দসৃষ্টি করা যায়। কিংবা, কোন চ্যাপ্টা পিরিচের মত তড়িৎকুণ্ডলীতে ঠিকমত তড়িৎপ্রবাহ পাঠিয়ে কিছু সময় অন্তর অন্তর তাপমাত্রার পরিবর্তন ঘটিয়েও এই শব্দ সৃষ্টি করা যায়। কিন্তু এই পদ্ধতিতে অসুবিধা হল এই যে, ক্রমাগত তাপ দেবার ফলে তরল হিলিয়াম বাষ্পীভূত হয়। এই অসুবিধা দূর করার জন্য একটি পদ্ধতি আবিষ্কৃত হয়েছে। এতে, একটি স্থায়ী চুম্বক ক্ষেত্রের উপর অন্তরক (alternating) চুম্বকক্ষেত্র চাপিয়ে প্যারাম্যাগনেটিক লবনে তাপমাত্রার তারতম্য ঘটিয়ে দ্বিতীয় শব্দ সৃষ্টি করা হয়।

এই দ্বিতীয় শব্দের বেগের গাণিতিক প্রকাশন, দ্বিপ্রবাহ চিত্রের সাহায্যে, তাপগতিবিদ্যার উপর ভিত্তি করে তৈরী করা যায়। মনে করা যাক, তরল হিলিয়ামের অসীম লম্বা একটি স্তম্ভ রয়েছে, ঐটির প্রস্থচ্ছেদের আয়তন হল A এবং ঐটির তাপমাত্রা T। এখন মনে করা যাক যে, একপ্রান্তে $T+\triangle T$ তাপমাত্রার উৎস থেকে τ সময় ধরে তাপ সরবরাহ করা হয়, $\triangle T$ এবং τ উভয়েই খুবই ক্ষুদ্র। এখন, তাপমাত্রার বৃদ্ধি $\triangle T$ তরল স্তম্ভ দিয়ে ω_2 বেগে প্রবাহিত হবে। ধরে নেওয়া হল যে, এই শব্দ প্রবাহে কোনরূপ বিকৃতি বা বিরতি হবে না। τ সময়ে $\omega_2\tau$ দৈর্ঘ্যযুক্ত এবং $\omega_2\tau A$ আয়তনযুক্ত স্তম্ভ অতিক্রান্ত হবে (৪৪নং চিত্র)।

এই আয়তন তরল থেকে বাদবাকী তরলের পার্থক্য হবে তাপমাত্রার এবং স্বাভাবিক ও অতিপ্রবাহধর্মী পরমাণুর গতির দিক থেকে।



৪৪ নং চিত্র—II নং তরল হিলিয়ামের দ্বিতীয় শব্দপ্রবাহ।

সাধারণ পরমাণুগুলির প্রবাহের দিকে v_n বেগ এবং অতিপ্রবাহধর্মী পরমাণুগুলির প্রবাহের বিপরীত দিকে v_s বেগ থাকে (চিত্র ৪৪ দ্রষ্টব্য)। প্রতি একক আয়তনে মোট ভরবেগ হল $\rho_n v_n + \rho_s v_s$; এখানে ρ_n ও ρ_s হচ্ছে

যথাক্রমে সাধারণ ও অতিপ্রবাহধর্মী পরমাণুর ঘনত্ব। কাজেই মোট ঘনত্ব হচ্ছে $\rho = \rho_n + \rho_s$। দ্বিতীয় শব্দের প্রবাহের বেলায় একক আয়তনে মোট ভরবেগের পরিমাণ শূন্য হবে। কিন্তু প্রথম শব্দ প্রবাহের ক্ষেত্রে ঠিক বিপরীতটি ঘটে।

যদি $w_2 \tau A$ অংশের তাপমাত্রা $\triangle T$ বৃদ্ধি করতে H পরিমাণ তাপ প্রয়োজন হয়, তাহলে

$$H = \rho c w_2 \tau A \triangle T \qquad \dots \quad (41)$$

এখানে c হল $w_2 \tau A$ অংশের তরলের 'আপেক্ষিক তাপ' (specific heat)। যদি τ সময় পরে তাপের উৎসকে সরিয়ে ফেলা হয়, তাহলে তরলের মধ্যে পার্শ্ববর্তী স্থানগুলিতে অধিক তাপের স্থানগুলি এবং সাধারণ ও অতিপ্রবাহধর্মী পরমাণুগুলির আপেক্ষিক চলন একের পর এক দেখা দেবে এবং এই চলার দ্রুতি হল w_2। শক্তি H একস্থান থেকে অন্য স্থানে দেখা দেবে। কাজেই, একে আমরা একধরণের তাপপ্রবাহ বলতে পারি, কিন্তু এটা তাপের পরিবহন বা পরিচলন প্রবাহ নয়। H তাপের ফলে সাধারণ পরমাণুগুলির সংখ্যা কিঞ্চিৎ বৃদ্ধি পাবে এবং অতিপ্রবাহধর্মী পরমাণুগুলির সংখ্যা কিঞ্চিৎ হ্রাস পাবে।

তাপমাত্রার বৃদ্ধির জন্য এনট্রপির পরিবর্তনের পরিমাণ হল :

$$\triangle S = \rho c w_2 \tau A \int_T^{T+\triangle T} \frac{\triangle T}{T} = \rho c w_2 \tau A \log\left(1 + \frac{\triangle T}{T}\right)$$

$$= \rho c w_2 \tau A \left[\frac{\triangle T}{T} - \frac{1}{2}\left(\frac{\triangle T}{T}\right)^2\right]$$

$$= \frac{H}{T}\left(1 - \frac{1}{2}\frac{\triangle T}{T}\right) \qquad \dots \quad (42)$$

যেহেতু, এই পরিমাণ এনট্রপি A পরিমাণ স্থান τ সময়ে অতিক্রম করে, এনট্রপির প্রবাহ ঘনত্ব হল $\frac{H}{T\tau A}$। 'দ্বি-প্রবাহ' চিত্র অনুসারে, এই এনট্রপি কেবলমাত্র সাধারণ পরমাণুদ্বারাই বাহিত হয়, কারণ অতিপ্রবাহধর্মী পরমাণুগুলির এনট্রপি শূন্য। যেহেতু, সাধারণ পরমাণুগুলি, যাদের ঘনত্ব হল ρ_n এবং প্রতি একক ভরে এনট্রপি হল S_n, v_n বেগে যায়, এনট্রপির প্রবাহ-ঘনত্ব হল $\rho_n S_n v_n$। কিন্তু আবার, $\rho S = \rho_n S_n$, কারণ অতিপ্রবাহধর্মী পরমাণুর এনট্রপি $S_s = 0$। কাজেই,

$\rho_n S_n v_n = \rho S v_n$, কাজেই, আমরা পাচ্ছি

$$H = \rho S v_n \tau A T \qquad \dots \quad (43)$$

সমীকরণ, (41) ও (43) থেকে দেখা যায়,

$$\frac{\triangle T}{T}=\frac{Sv_n}{cw_2}$$

এবং $$\frac{H\triangle T}{T}=\frac{\rho S^2 v_n{}^2 \tau AT}{cw_2} \quad \dots \quad (44)$$

$w_2\tau A$ এই অংশের তরলের গতিশক্তি (Kinetic energy) K এইভাবে লেখা যায়,

$$\frac{K}{w_2\tau A}=\tfrac{1}{2}\rho_n v_n{}^2+\tfrac{1}{2}\rho_s v_s{}^2$$

কিন্তু $\rho_n v_n+\rho_s v_s=0$

অথবা, $$v_s=-\frac{\rho_n}{\rho_s}v_n$$

সুতরাং $$\frac{K}{w_2\tau A}=\tfrac{1}{2}\rho_n\left(1+\frac{\rho_n}{\rho_s}\right)v_n{}^2=\tfrac{1}{2}\rho\frac{\rho_n}{\rho_s}v_n{}^2$$

কাজেই, $$K=\tfrac{1}{2}\rho\frac{\rho_n}{\rho_s}v_n{}^2 w_2\tau A \quad \dots \quad (45)$$

পূর্বেই বলা হয়েছে, স্বাভাবিক পরমাণুগুলির শব্দের গতির অভিমুখে v_n বেগ থাকে এবং অতিপ্রবাহধর্মী পরমাণুগুলির শব্দের গতির বিপরীত দিকে v_s বেগ থাকে। প্রতি একক আয়তনে মোট ভরবেগ (momentum) হল $\rho_n v_n+\rho_s v_s$। দ্বিতীয় শব্দপ্রবাহের ক্ষেত্রে এই মোট ভরবেগের মান শূন্য।

$w_2\tau A$ আয়তনের তরলের তাপমাত্রা $\triangle$T বৃদ্ধি করতে H পরিমাণ তাপ প্রয়োজন হয়, তাহল

$$H=\rho cw_2\tau A\triangle T$$

c হচ্ছে ঐ আয়তনের বিশেষ আপেক্ষিক। যদি τ সময় পরে তাপের উৎস সরিয়ে ফেলা হয়, তাহলে উচ্চ তাপমাত্রার অঞ্চল ক্রমাগত সরতে থাকে, স্বাভাবিক ও অতিপ্রবাহধর্মী পরমাণুগুলির আপেক্ষিক গতিও সরতে থাকে, শক্তি H একস্থান থেকে অন্য স্থানে যায়। একে আমরা একপ্রকারের তাপপ্রবাহ মনে করতে পারি, যদিও এটা তাপের সাধারণ প্রবাহের মত নয়। তাপ H এর ফলে স্বাভাবিক পরমাণুর সংখ্যা সামান্য বৃদ্ধি পায় এবং অতিপ্রবাহধর্মী পরমাণুর সংখ্যা সামান্য হ্রাস পায়, সেজন্য একে এক ধরণের উদ্দীপনা-শক্তি প্রবাহ বলা যায়।

যদি τ সময়ের পর তাপের উৎসটিকে সরিয়ে নেওয়া হয়, তাহলে যে পরিমাণ গতিশক্তি K তরলের মধ্য দিয়ে অটুটভাবে প্রবাহিত হতে পারে তা (45) নং প্রশশনে দেখান হয়েছে। কাজেই যে কোন সময় $w_2\tau A$ আয়তনের এইরূপ তরল পাওয়া যাবে যার একক আয়তনে গতিশক্তি হবে,

$$\frac{K}{w_2\tau A}=\tfrac{1}{2}\rho\rho_n\ \frac{v_n^2}{\rho_s} \qquad \ldots \quad (46)$$

এবং একক আয়তনে উত্তেজনা শক্তি (excitation energy) হবে,

$$\frac{H}{w_2\tau A}=\rho c\triangle T \qquad \ldots \quad (47)$$

এই উভয় প্রকার শক্তিই একত্রে তরলের মধ্য দিয়ে সময়ের সাথে অপরিবর্তিত ভাবে প্রবাহিত হয়, একে অন্যের মধ্যে রূপান্তরিত হয় না।

এখন, তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র অনুসারে আমরা পাই,

$$Q=H+K, \qquad \ldots \quad (48)$$

Q হচ্ছে $T+\triangle T$ তাপমাত্রার উৎস থেকে যে তাপ নির্গত হচ্ছে, H হচ্ছে $w_2\tau A$ আয়তনের তরলের তাপমাত্রা $\triangle T$ বৃদ্ধি করতে যে পরিমাণ তাপ প্রয়োজন হয় এবং K হচ্ছে তার গতিশক্তি।

তাহলে, উৎসের এনট্রপির পরিবর্তনের পরিমাণ হল $-\dfrac{Q}{T+\triangle T}$

কিন্তু, পূর্বেই আমরা দেখেছি যে, তাপমাত্রার বৃদ্ধির ফলে $w_2\tau A$ পরিমাণ তরলের এনট্রপির পরিবর্তনের পরিমাণ হল

$$\frac{H}{T}\left(1-\tfrac{1}{2}\frac{\triangle T}{T}\right)$$

যা কিনা এভাবে পাওয়া যায়,

$$\triangle S=\rho cw_2\tau A\int_T^{T+\triangle T}\frac{dT}{T}$$

$$=\rho cw_2\tau A\ l_n\left(1+\frac{\triangle T}{T}\right)$$

$$=\rho cw_2\tau A\left[\frac{\triangle T}{T}-\tfrac{1}{2}\left(\frac{\triangle T}{T}\right)^2\right]$$

$$=\frac{H}{T}\left(1-\tfrac{1}{2}\frac{\triangle T}{T}\right)$$

কাজেই, প্রক্রিয়াটি উভমুখী (Reversible) ধরে নিয়ে আমরা মোট এনট্রপির পরিবর্তনকে শূন্য ধরতে পারি, কারণ, এই বিশ্ব জগতের মোট এনট্রপির পরিবর্তন শূন্য।

কাজেই, আমরা লিখতে পারি,

$$-\frac{Q}{T+\triangle T}+\frac{H}{T}\left(1-\frac{1}{2}\frac{\triangle T}{T}\right)=0$$

তাহলে, পাওয়া যাচ্ছে $\frac{-H}{T+\triangle T}-\frac{K}{T+\triangle T}+\frac{H}{T}\left(1-\frac{1}{2}\frac{\triangle T}{T}\right)=0$

সুতরাং $\frac{1}{2}\frac{H\triangle T}{T^2}-\frac{K}{T}=0$

অথবা, $\frac{H\triangle T}{T}=2K \qquad \ldots \quad (49)$

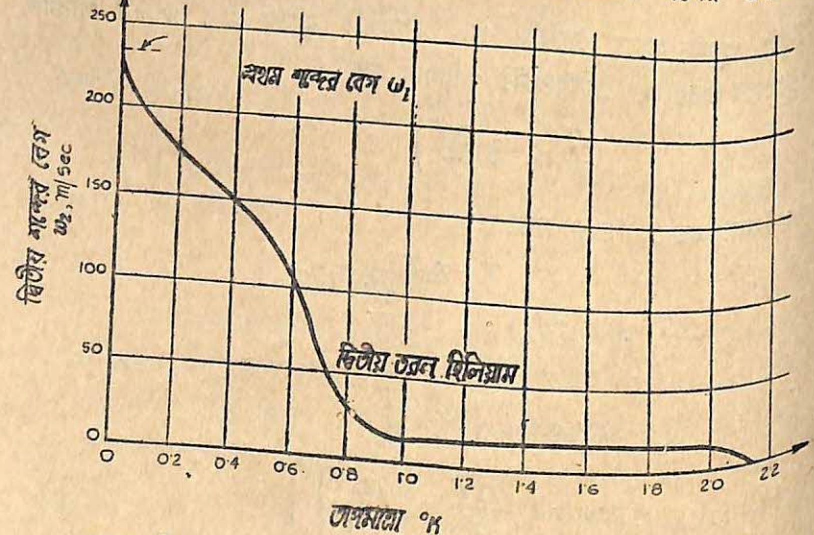
কাজেই আমরা পাচ্ছি,

$$\frac{\rho_s{}^2 v_n{}^2 \tau AT}{cw_2}=\rho\,\frac{\rho_n}{\rho_s}v_n{}^2 w_2 \tau A$$

অথবা, $w_2=\sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_n}\frac{s^2T}{c}} \qquad \ldots \quad (50)$

এটিই হল দ্বিতীয় শব্দের বেগের সমীকরণ।

দ্বিতীয় শব্দবেগের তাপমাত্রার সাথে হ্রাসবৃদ্ধি (৪৫) নং লেখচিত্রে দেখান হয়েছে। 1° কেলভিন থেকে 2° কেলভিন পর্যন্ত এই দ্বিতীয় শব্দের বেগের



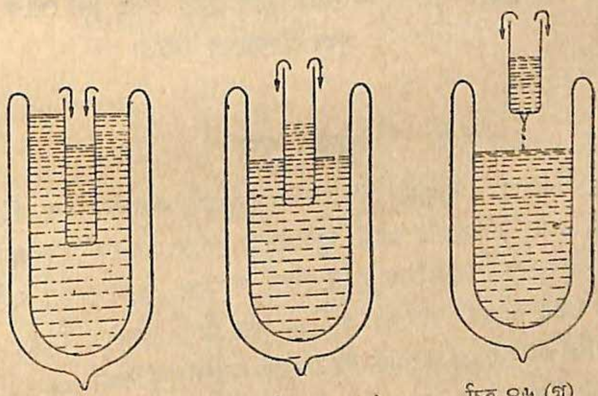
৪৫ নং চিত্র—তাপমাত্রার সাথে দ্বিতীয় শব্দবেগের পরিবর্তনের হার।

মান মোটামুটিভাবে 18 মি./সেকেণ্ড হয়ে থাকে। কিন্তু, তারপর থেকে এটি

কমতে থাকে এবং λ বিন্দুতে গিয়ে শূন্য হয়ে যায়। ·6° কেলভিনের নীচে তাপমাত্রা যতই নামতে থাকে, ততই দেখা যায় যে, এই দ্বিতীয় শব্দের বেগের পরিবর্তনও দ্রুত হচ্ছে।

তৃতীয় শব্দ

কামেরলিঙ্ ওনেস্ ১৯৭২ সালে একটি অদ্ভুৎ ঘটনা লক্ষ্য করেন যে, দুইটি সমকেন্দ্রিক বৃত্তাকার চোঙের মধ্যে II নং তরল হিলিয়াম রেখে একটি চোঙ অপর চোঙের মধ্যে রাখলে উভয়ের মধ্যে তরল হিলিয়ামের উচ্চতা এক হয়ে যায়, অথচ যদিও উভয় চোঙের মধ্যে কোনো যোগাযোগ থাকে না। ১৯৩৬ সালে রোলিন (Rollin) বললেন যে, II নং তরল হিলিয়ামের মধ্যে কোন কঠিন তল রাখলে তার গায়ে হিলিয়ামের একটি সূক্ষ্ম আস্তরণ জমা হয়, যার জন্য ঐ ঘটনা ঘটে। এই সূক্ষ্ম আস্তরণটি একটি নির্দিষ্ট বেগের সাহায্যে ঘর্ষণ ছাড়াই উঁচু থেকে নীচুতে নেমে আসে। বিষয়টি ৪৬ (ক), (খ), (গ) চিত্রের সাহায্যে দেখান হল।



চিত্র নং ৪৬ (ক) চিত্র ৪৬ (খ) চিত্র ৪৬ (গ)

II নং তরল হিলিয়ামের এরকম গড়িয়ে চলা সূক্ষ্ম আস্তরণ (creeping film) নিয়ে অনেক পরীক্ষা-নিরীক্ষা হয়েছে। পরীক্ষা-নিরীক্ষার ফলে বোঝা গিয়েছে যে, λ বিন্দুতে এই সূক্ষ্ম আস্তরণের গড়িয়ে চলার হার শূন্য হয়। λ বিন্দুর উপরে তাপমাত্রার বৃদ্ধির সাথে ঐটি বৃদ্ধি পেতে থাকে। জ্যাকসন দেখিয়েছেন যে, হিলিয়ামের এই সূক্ষ্ম আস্তরণের বেধ প্রায় $১০^{-৬}$ সে. মি.র

মত হয় এবং যতই ঐটি তরল হিলিয়াম থেকে দূরে সরতে থাকে, ততই তার বেধ কমতে থাকে। ১৯৫৯ সালে এ্যাটকিনস্ বললেন যে, তরল হিলিয়ামের সূক্ষ্ম আস্তরণের উপর এক ধরণের তরঙ্গ নিশ্চয়ই থাকবে, যাকে তিনি নাম দিলেন তৃতীয় শব্দ তরঙ্গ। তাঁর অনুমান যে, এই ঘটনায় অতি প্রবাহধর্মী অংশ স্পন্দিত হয়, কিন্তু স্বাভাবিক অংশ দেওয়ালের সাথে লেগে থাকে। এই ঘটনাটিকে অগভীর জলে যে ধরণের তরঙ্গ দেখা যায় তার সাথে তুলনা করা যায়। ঐ তৃতীয় শব্দের বেগ অনেক পরীক্ষা-নিরীক্ষার পর দেখা গিয়েছে যে, মোটামুটিভাবে 20 থেকে 500 মি./সেকেণ্ড এর মধ্যে থাকে। তত্ত্বগত আলোচনার থেকে দেখা গিয়েছে যে, সাধারণভাবে এই তৃতীয় শব্দের বেগকে এইভাবে প্রকাশ করা যায়।

$$w_3{}^2 = 3\,(\rho_s / \rho)\, a_g y$$

এখানে w_3 = তৃতীয় শব্দের বেগ

ρ_s = অতিপ্রবাহধর্মী অংশের ঘনত্ব

ρ = সামগ্রিক ঘনত্ব

a_g = মাধ্যাকর্ষণ জনিত ত্বরণ

এবং y = তরল হিলিয়ামের উপর তল থেকে সূক্ষ্ম আস্তরণের উচ্চতা।

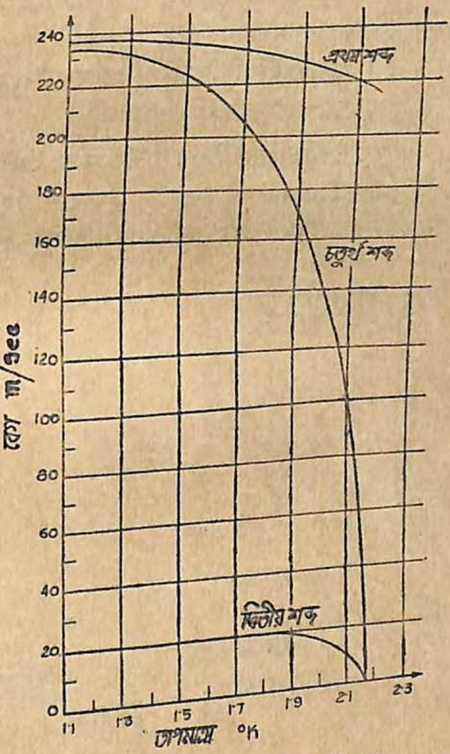
চতুর্থ শব্দ

১৯৪৮ সালে পেলাম (Pellam) অনুমান করলেন যে, II নং তরল হিলিয়ামে এমন একপ্রকার তরঙ্গ সৃষ্ট হতে পারে, যাতে কেবলমাত্র অতি প্রবাহধর্মী পরমাণুগুলি কম্পিত হবে, কিন্তু সাধারণ পরমাণুগুলি কম্পিত হবে না, কারণ তারা সচ্ছিদ্র পদার্থের সরু অংশের মধ্যে আটকে যাবে। ১৯৫৯ সালে এ্যাটকিনসও (Atkins) এই তত্ত্বকে সমর্থন করলেন এবং এই জাতীয় তরঙ্গকে চতুর্থ শব্দ তরঙ্গ আখ্যা দিলেন। এর থেকে পূর্বেকার প্রথম, দ্বিতীয় প্রভৃতি শব্দতরঙ্গগুলির পার্থক্য হল যে, যখন সাধারণ পরমাণুগুলি চলাফেরা করতে পারে, তখন প্রথম ও দ্বিতীয় শব্দের সৃষ্টি সম্ভব। কিন্তু যখন সাধারণ পরমাণুগুলি চলাফেরা করতে পারে না, তখন দ্বিতীয় শব্দ প্রবাহিত হতে পারে না এবং প্রথম শব্দ চতুর্থ শব্দে পরিবর্তিত হয়। রুড্নিক ও স্যাপিরো (Rudnick & Shapiro) অত্যন্ত ঠাসা সচ্ছিদ্র বস্তু নিয়ে পরীক্ষা করেন, ছিদ্রগুলির ব্যাস ·03 মিমির চেয়েও কম ছিল। দেখা গেল যে, চতুর্থ শব্দের

বেগ প্রথম ও দ্বিতীয় শব্দের বেগের মাঝামাঝি থাকছে (৪৭ লেখচিত্র দ্রষ্টব্য)। তত্ত্বীয় আলোচনা থেকে এই চতুর্থ শব্দের বেগ w_4-কে এইভাবে প্রকাশ করা যায়

$$w_4 = \left(\frac{\rho_s}{\rho} w_1{}^2 + \frac{\rho_n}{\rho} w_2{}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \ldots \quad \ldots (51)$$

এখানে w_1, w_2 যথাক্রমে প্রথম ও দ্বিতীয় শব্দের বেগ।



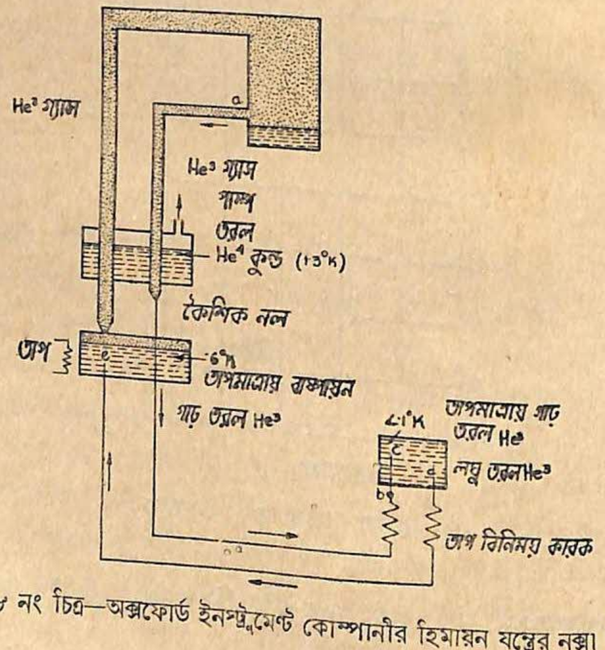
৪৭ নং চিত্র—চতুর্থ শব্দের লেখচিত্র।

অতিপ্রবাহধর্মী হিলিয়াম⁴ এর মধ্য দিয়ে হিলিয়াম³র চলন

তরল হিলিয়াম³ কে (হিলিয়াম এর আইসোটোপ) তরল হিলিয়াম⁴ এর মধ্যে দ্রবীভূত করা যেতে পারে এবং এই প্রকার দ্রবণ নিয়ে পরীক্ষা-নিরীক্ষার ফলে নানা কৌতূহলদ্দীপক ব্যাপার দেখা গিয়েছে। যেমন, প্রথমতঃ

হিলিয়াম^3 কে হিলিয়াম^4 এ দ্রবীভূত করলে তাপের উদ্ভব হয় এবং যখন প্রক্রিয়াটি রুদ্ধতাপ পদ্ধতিতে ঘটে, তখন জিনিসটি ঠাণ্ডা হয়ে যায়। দ্বিতীয়তঃ, যদি ·6° কেলভিন তাপমাত্রায় এই দ্রবণে তাপ প্রয়োগ করা হয়, যার ফলে হিলিয়াম^4 এর বাষ্পচাপ ·001 মি. মি.র নীচে নেমে যাবে, তাহলে দ্রবীভূত হিলিয়াম^3 দ্রবণ থেকে বাষ্পীভূত হয়ে উপে যাবে। কারণ হিলিয়াম^{3}র বাষ্পচাপ হচ্ছে ·6 মি. মি.। তৃতীয়তঃ, যদি হিলিয়াম^{3}র দ্রবণের তাপমাত্রা ·87° কেলভিনের নীচে নামান যায়, তাহলে ঐ দ্রবণ পরিষ্কারভাবে দুইটি অংশে বিভক্ত হয়ে যাবে—একটি অংশ ঘন দ্রবণ এবং অপরটি লঘু দ্রবণ। চতুর্থতঃ হিলিয়াম^{3}র পরমাণু অতিপ্রবাহধর্মী হিলিয়াম^4 এর মধ্য দিয়ে ধীরে ধীরে ঘন অংশ থেকে লঘু অংশে চুঁইয়ে প্রবেশ করে (diffuse)।

হিলিয়াম^{3}র এইসব বৈশিষ্ট্যের উপর ভিত্তি করে হল, ফোর্ড, টমসন ইত্যাদি (Hall, Ford, Thomson) একটি চমকপ্রদ হিমায়ন চক্র সৃষ্টি করেছেন এবং অক্সফোর্ড ইনস্ট্রুমেণ্ট কোম্পানী সেই অনুযায়ী একটি হিমায়ন যন্ত্রও



৪৮ নং চিত্র—অক্সফোর্ড ইনস্ট্রুমেণ্ট কোম্পানীর হিমায়ন যন্ত্রের নক্সা।

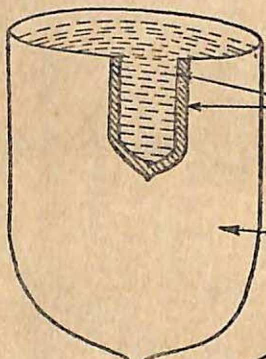
তৈরী করেছেন। ঐ যন্ত্রটি কোন পরীক্ষাস্থলে 1° কেলভিন পর্যন্ত তাপমাত্রা বজায় রাখতে পারে। ঐ যন্ত্রটির নিদর্শন মূলক চিত্র উপরে দেওয়া হয়েছে।

পাম্পটি বিশুদ্ধ হিলিয়াম^3 কে পাম্প করে পাঠায়, যার তাপমাত্রা পথিমধ্যে 1° কেলভিন পর্যন্ত নেমে যায়। ঐটি ঘনদ্রবণে প্রবেশ করে এবং এর কিছু অংশ লঘু দ্রবণে ঢোকে। এখানে তাপশোষণ ঘটে, তারপর হিলিয়াম^3 হিলিয়াম^4 এর চাপে বাষ্পীভূত হয়। আবার পাম্পের সাহায্যে এই হিলিয়াম^3 গ্যাস পূর্বেকার অবস্থানে ফিরে আসে।

নিম্নতাপমাত্রার বিভিন্ন প্রয়োগ

তরলায়িত গ্যাসকে রাখার ব্যবস্থা

নিম্নতাপমাত্রার বিভিন্ন প্রয়োগ সম্পর্কে জানতে হলে প্রথমে জানা দরকার কিভাবে তরলায়িত গ্যাসকে রাখা যায়। জেমস্ ডেওয়ার (James Dewar) সর্বপ্রথম ১৮৯২ সালে এমন একধরণের পাত্র তৈরী করেন যার মধ্যে তরলায়িত গ্যাসকে কিছুকাল রাখা চলে। এইরূপ পাত্রই পরবর্তীকালে ডেওয়ার-ফ্লাস্ক বা থার্মফ্লাস্ক নামে সারা পৃথিবীতে প্রচলিত হয়েছে।

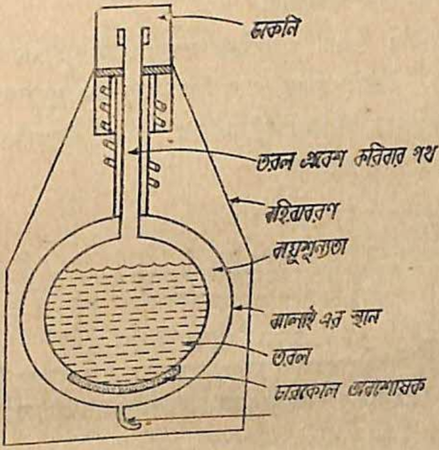


৪৯ নং চিত্র—ডেওয়ার ফ্লাস্ক।

কিন্তু এটি পরিবহনে অসুবিধা বলে এর আকৃতি কিছুটা পরিবর্তিত করে এক ধরণের পাত্র তৈরী করা হয়েছে, যার ছবি পরপৃষ্ঠায় দেওয়া হল।

এটির আকৃতি, ছবিতে দেখা যাছে, অনেকটা গোলাকার পিপের মত। এটির একটি সরু গলা আছে, যার মধ্য দিয়ে তরল গ্যাস ঢোকান বা বের করা হয়। ঐ গলাটি এমনভাবে তৈরী করা হয়,যাতে তার তাপ পরিবহন ক্ষমতা খুব কম হয়।

যদি অবশ্য তরল হাইড্রোজেন বা তরল হিলিয়াম রাখার প্রশ্ন আসে, তাহলে আবার পাত্রটির মধ্যে কয়েকটি দেওয়াল পরপর রাখতে হয়। পাত্রের



৫০নং চিত্র—উন্নত ধরণের ডেওয়ার।

মধ্যস্থ তরল হিলিয়ামের চারপাশে দুটি দেওয়ালের মধ্যবর্তী স্থানকে বায়ুশূন্য করা হয়। তার চারপাশে আরও দুটি দেওয়ালের মধ্যবর্তী স্থানে তরল নাইট্রোজেন রাখা হয়। এই ব্যবস্থায় তরল হিলিয়ামের বাষ্পীভবন খুম কম হয়।

আজকাল অবশ্য আরও উন্নত ধরণের তরলায়িত অক্সিজেন, নাইট্রোজেন, হাইড্রোজেন প্রভৃতি রাখার পাত্র ব্যবহার করা হয়। এসব ক্ষেত্রে প্রায়ই তাপ-নিরোধী চূর্ণ পদার্থ ব্যবহৃত হয়।

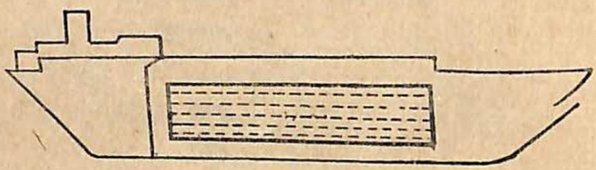


৫১নং চিত্র—তরলায়িত গ্যাস বহনের ট্রাক।

শিল্প বা কারিগরী কাজে তরল অক্সিজেন, নাইট্রোজেন প্রভৃতি এখন প্রচুর পরিমাণ ব্যবহৃত হয়। এইসব প্রয়োজনে তরল অক্সিজেন, নাইট্রোজেন ইত্যাদি

একস্থান থেকে অন্যস্থানে বহন করার জন্য ট্রাকের উপর বিশেষ আকৃতির পাত্র বসান থাকে, যার মধ্যে তরলায়িত গ্যাস থাকে। কিংবা তরলটিকে বিরাট তাপরোধী ট্যাংকে সঞ্চয়িত রাখা যায়।

আজকাল আবার প্রচুর পরিমাণ তরল গ্যাস বহনের জন্য বিরাট বিরাট ট্রেইলার (trailer) তৈরী হচ্ছে, যার সাহায্যে দূর দূরান্তরে সহজেই তরল অক্সিজেন বা মিথেন ইত্যাদি পাঠান যায়। এই উদ্দেশ্যে বিশেষ আকৃতির জাহাজ পর্যন্ত তৈরী করা হয়েছে।



৫২নং চিত্র—তরল গ্যাস বহনের জাহাজের নক্সা।

তরল হাইড্রোজেন সঞ্চয়ের একটি অসুবিধা

তরল হাইড্রোজেনকে নাড়াচাড়া করা বা পাত্রে সঞ্চিত করে রাখার ক্ষেত্রে একটা বিচিত্র সমস্যার উদ্ভব হয় যা অন্য গ্যাসের ক্ষেত্রে দেখা যায় না। হাইড্রোজেনের দ্বিবিধ রূপ দেখা যায়—অর্থো (Ortho) ও প্যারা (Para) রূপ। হাইড্রোজেন পরমাণুর কেন্দ্রীণে থাকে একটি প্রোটন এবং তার চতুপার্শে একটি ইলেকট্রন ঘোরে, উভয়েই তাদের নিজ নিজ অক্ষের উপরও পাক খায়। যখন এরূপ দুটি হাইড্রোজেন পরমাণুতে ইলেকট্রনগুলির নিজ অক্ষের উপর আবর্তন বিপরীতমুখী হয়, তখন ঐ দুটি হাইড্রোজেন পরমাণু মিলিত হয়ে হাইড্রোজেন অণুতে পরিণত হয়। এখন, যদি ঐ দুটি পরমাণুতে প্রোটনের নিজ অক্ষের উপর আবর্তন সমমুখী হয়, তাহলে ঐ দুটি পরমাণু মিলে অর্থো-হাইড্রোজেন অণু গঠন করে। আর, যদি ঐ দুটি পরমাণুতে প্রোটন দ্বয়ের আবর্তন বিপরীত মুখী হয়, তাহলে প্যারা-হাইড্রোজেন পরমাণু গঠিত হবে। এখন, সাধারণ তাপমাত্রায় হাইড্রোজেন গ্যাসে অর্থো ও প্যারা অণুর অনুপাত 3 : 1 এই হিসাবে থাকে। তরলীকরণের পর ঐ অর্থো হাইড্রোজেন অণুগুলি ধীরে ধীরে প্যারা হাইড্রোজেন অণুতে রূপান্তরিত হয় এবং অবশেষে ঐটি সাম্য অবস্থায় আসে। এই রূপান্তরের ফলে তাপের উদ্ভব হয়, যা কিনা তরল হাইড্রোজেনের

ক্ষেত্রে খুবই বিপদজনক। এইজন্য সাম্য অবস্থায় উপনীত হবার পূর্বে তরল হাইড্রোজেনকে সঞ্চিত করা বা নাড়াচাড়া করা খুবই সমস্যার ব্যাপার। এখন এই সাম্য অবস্থায় উপনীত হতে তরল হাইড্রোজেনের খুব দীর্ঘ সময় লাগে। এইজন্য, বর্তমানে কোন কোন অনুঘটক, যথা ক্রোমিয়াম অক্সাইড ইত্যাদি প্রয়োগ করে এই অর্থো থেকে প্যারা অবস্থায় রূপান্তরকে দ্রুত করা হয় যাতে কিনা খুব তাড়াতাড়ি সাম্য অবস্থা আসে এবং তরল হাইড্রোজেনকে নিরাপদে সঞ্চিত করা যায়।

গ্যাসের পৃথকীকরণ

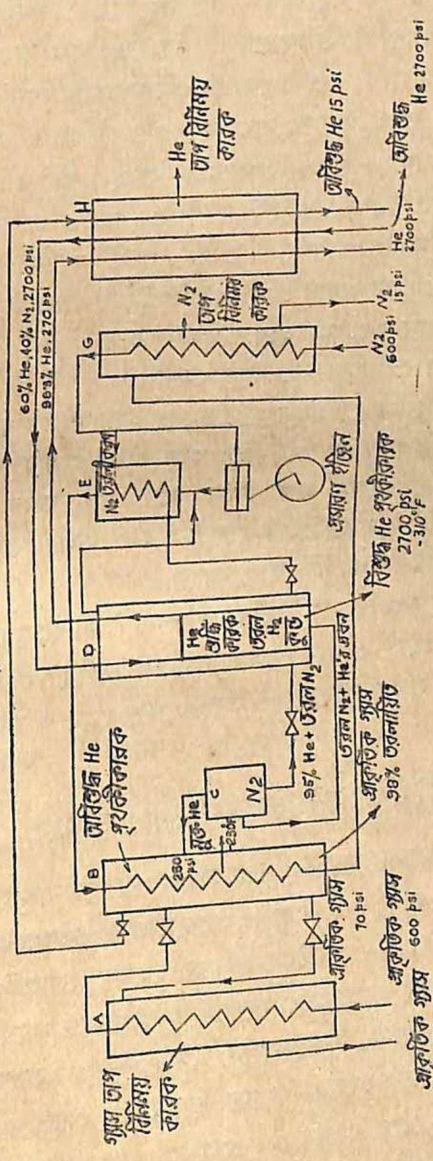
গ্যাসের পৃথকীকরণ ও বিশুদ্ধিকরণের ক্ষেত্রে নিম্নতাপমাত্রার ভূমিকা খুবই গুরুত্বপূর্ণ। বায়ুকে তরল করে তাকে পাতিত করলে অক্সিজেন, নাইট্রোজেন, নিয়ন, আরগন, ক্রিপটন, জেনন প্রভৃতি বিভিন্ন কাজে ব্যবহৃত গ্যাসগুলির অনেকটাই পাওয়া যায়। বায়ু থেকে হিলিয়াম খুবই সামান্য পাওয়া যায়। হিলিয়ামের প্রধান উৎস হল প্রাকৃতিক গ্যাস এবং তার পৃথকীকরণের জন্যও নিম্নতাপমাত্রার প্রয়োজন। কোকওভেন গ্যাস থেকে হাইড্রোজেনকে পৃথক করা হয়। এখানে আমরা সংক্ষেপে কয়েকটি গ্যাসের পৃথকীকরণ প্রক্রিয়া আলোচনা করব।

শোধনস্তম্ভ

গ্যাসের পৃথকীকরণের জন্য গুরুত্বপূর্ণ শোধনস্তম্ভের কথা প্রথমে সংক্ষেপে বলে নেওয়া যাক। এর ক্রিয়া নির্ভর করে গ্যাসমিশ্রণটির অন্তর্গত উপাদানগুলির বিভিন্ন বাষ্পচাপের উপর। যখন কোন গ্যাসমিশ্রণের তরল ও বাষ্পীয় দশার মধ্যে সাম্য অবস্থা আসে, তখন মিশ্রণের অন্তর্গত নিম্ন স্ফুটনাংকের উপাদানটি ঘনীভূত হতে থাকে। কাজেই, তরল মিশ্রণটির বাষ্পায়নের ফলে যে বাষ্প উৎপন্ন হয়, তাতে নিম্ন স্ফুটনাংকের তরলের মাত্রা বেশী থাকে। আর যে তরলটি পড়ে থাকে, তাতে উচ্চ স্ফুটনাংকের উপাদানটির পরিমাণ বেশী হয়। এর ফলে, গ্যাসগুলির আংশিকভাবে পৃথকীকরণ ঘটে।

শোধনস্তম্ভে ধাপে ধাপে অনেকবার বাষ্পায়ন ঘটান হয়। শোধনস্তম্ভের একেবারে নীচে থাকে তাপকুণ্ড (Boiler), মাঝে থাকে কতকগুলি ট্রে (Tray) বা

600 পাউণ্ড চাপে সংনমিত করা হয় এবং কার্বনডাই অক্সাইড, হাইড্রোজেন সালফাইড ও জলীয় বাষ্পমুক্ত করা হয়। তারপর তাকে তাপবিনিময় কারক A মধ্যে পাঠান হয়, সেখানে ঐটি শীতল বহির্গামী গ্যাসের সংস্পর্শে এসে প্রায় সবটাই ঘনীভূত হয়। তখন চাপ কমিয়ে প্রতি বর্গ ইঞ্চিতে 200 পাউণ্ড করা হয় এবং গ্যাসটিকে তাপবিনিময় কারক—পৃথকীকারক B তে পাঠান হয়, সেখানে ঐটি নাইট্রোজেন বাষ্পের সাহায্যে আরও শীতল হয়। পৃথকীকারক এ গ্যাসটির 98% তরল হয় এবং বাকী 2% বাষ্পীয় অংশের মধ্যে আবার $\frac{3}{5}$ ভাগ হিলিয়াম এবং $\frac{2}{5}$ ভাগ নাইট্রোজেন থাকে। একটি পৃথক হিমায়নচক্র থেকে শীতল নাইট্রোজেন বাষ্প তাপ বিনিময় কারক Bর শীতল নলগুলির মধ্যে প্রবাহিত হয় যা শীতলীকরণ ছাড়াও গ্যাসটিকে কিছুটা বিশুদ্ধ করে। এর থেকে যে কিছুটা অবিশুদ্ধ গ্যাসটি সংগ্রহ করা হয় তাকে প্রতি বর্গ-ইঞ্চিতে 2700 পাউণ্ড চাপে সংনমিত করে প্রথমে তাপবিনিময় কারক Hএ পাঠিয়ে ঠাণ্ডা করা হয় এবং পরে তরল নাইট্রোজেনে ডোবান পাত্র E তে পাঠিয়ে, গ্যাসটিকে যেটুকু নাইট্রোজেন ঐ হিলিয়ামে ছিল তার প্রায় সবটাই তরলীকরণ করে বের করে নেওয়া হয়।



৫৫ নং চিত্র—একটি হিলিয়াম গ্যাস পৃথকীকরণ প্রক্রিয়ার নক্সা।

মহাকাশ গবেষণায় নিম্নতাপমাত্রার ভূমিকা

মহাকাশ গবেষণা ও মহাকাশ অভিযানে নিম্নতাপমাত্রা একটি অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ অংশ বলে এখন স্বীকৃত হয়েছে। যে রকেটকে মহাকাশ গবেষণা-কার্য্যে উৎক্ষেপণ করা হয়, তার উৎক্ষেপন থেকে আরম্ভ করে ইঞ্জিনের নিয়ন্ত্রণ ও অন্যান্য বহু কার্য্যে তরল গ্যাসের ব্যবহার খুব বেশী হয়। রকেট উৎক্ষেপনে কঠিন জ্বালানীর তুলনায় তরল জ্বালানীর ব্যবহার অধিকতর সুবিধাজনক। কারণ, প্রথমতঃ তরল জ্বালানীর ক্ষেত্রে প্রতি পাউণ্ড জ্বালানীর খরচা করে যে পরিমাণ উর্দ্ধঘাত সৃষ্টি করা যায় তা প্রতি পাউণ্ড কঠিন জ্বালানীর ক্ষেত্রে প্রাপ্ত উর্দ্ধঘাতের থেকে অনেকগুণ বেশী। দ্বিতীয়তঃ, জ্বালানী যে গ্যাস নির্গত হয় তার আণবিক ওজন যত কম হবে, ততই ভাল। এই বৈশিষ্ট্য কঠিন জ্বালানীর থেকে তরল জ্বালানীর অনেকগুণ বেশী।

তরলায়িত গ্যাস, যথা তরল হাইড্রোজেন ইত্যাদি একদিকে যেমন রকেট উৎক্ষেপণে জ্বালানী হিসাবে খুব ভালভাবে কাজ করে, আবার অন্যদিকে রকেট যখন প্রচণ্ডবেগে বায়ুমণ্ডলের মধ্য দিয়ে ছুটে যায়, তখন যে বায়ুর সাথে ঘর্ষণজনিত উত্তাপসৃষ্টি হয়, তা থেকে রকেটকে রক্ষা করার জন্যও তরলায়িত গ্যাস একটি শীতল আবরণের মত কাজ করে।

এ ছাড়া, অত্যাধুনিক যে সব নিউক্লিয়ার রকেট তৈরী হচ্ছে সেগুলি চালাবার জন্য তাদের মধ্যে ছোট একটি পরমাণু কেন্দ্রিণ চুল্লী (Nuclear reactor) থাকে। ঐ চুল্লীতে জ্বালানী হিসাবেও তরল হাইড্রোজেনকে ব্যবহার করা হয়।

জীববিজ্ঞানে নিম্নতাপমাত্রার ভূমিকা

জীববিজ্ঞান ও নিম্নতাপমাত্রা—এদুটির মধ্যে আবার কি সম্পর্ক থাকতে পারে, এই কথাই প্রথমে মনে হয়, বরং খবরের কাগজে এরকম কথাই তো মধ্যে মধ্যে দেখতে পাওয়া যায়—'প্রবল শৈত্যপ্রবাহে দশজন লোক মারা গিয়েছে' ইত্যাদি। তাহলে আবার এদের মধ্যে কিরূপ সম্পর্ক থাকতে পারে? কিন্তু একটা মজার ঘটনা আছে যা আমরা সবাই জানি, সেটা উল্লেখ করলে যা বলতে চাওয়া হচ্ছে তা পরিষ্কার হবে। আমরা জানি যে গোটা শীতকালে সাপ, ব্যাঙ প্রভৃতি প্রাণীরা ঘুমিয়ে কাটায়। একে বলা হয় 'শীতঘুম'। 'শীতঘুম' না বলে একে কুম্ভকর্ণের ঘুম বললেও হয়, কারণ এই ঘুমের ব্যাপ্তি প্রায় ২/৩ মাস, কিন্তু ব্যাপারটা কি? আসলে ব্যাপার হল এই যে, মানুষ বা অন্যান্য উষ্ণ রক্ত বিশিষ্ট প্রাণীদের শরীরে এমন ব্যবস্থা আছে যে বাইরের

তাপমাত্রা নেমে গেলেও আমাদের শরীরের ভিতর গরম থাকে, কাজেই শীতকালের আবহাওয়া আমাদের কাবু করতে পারে না। কিন্তু সাপ ব্যাঙ প্রভৃতি শীতল রক্ত বিশিষ্ট প্রাণীদের শরীরে এরূপ কোন ব্যবস্থা না থাকায় আবহাওয়া শীতল হলে তারা সহজেই কাবু হয়ে পড়ে। তখন তারা এমন আচ্ছন্নভাবে পড়ে থাকে যে আপাত দৃষ্টিতে তাদের সজীব মনে হয় না। তখন তাদের শরীরের আভ্যন্তরীণ সকল ক্রিয়া অত্যন্ত মৃদুগতিতে চলে। একেই বলা হয় 'শীতঘুম'। দেখা গিয়েছে যে, এইসময় শরীরের ক্ষয় খুবই কম হয়। এ থেকে বিজ্ঞানীরা চিন্তা করেছেন যে, খুবই কম তাপমাত্রায়, যথা, তরল নাইট্রোজেনের তাপমাত্রায় কোন জীবদেহকে কিছুকাল রেখে পরে আবার তাকে উষ্ণ করলে তার শরীরের ক্ষয় কিছুকাল রোধ করা যায় কিনা। এ বিষয়ে প্রথম পরীক্ষা নিরীক্ষা করেন ইটালীর পুরোহিত (এবং বিজ্ঞানী) **স্প্যালানজানি** (Spallanzani)। তিনি মাছ, সরীসৃপ, ডিম, কীটপতঙ্গ, পাখি প্রভৃতির উপর নিম্নতাপমাত্রার প্রভাব নিয়ে পরীক্ষা নিরীক্ষা করেন। অবশ্য রোমার থার্মমিটার স্কেলের উদ্ভাবক **রোমারও** (Reaumar) এ বিষয়ে কিছু কিছু পরীক্ষা নিরীক্ষা চালান। কিন্তু এ বিষয়ে সঠিকভাবে প্রথম পরীক্ষাকার্য্য সম্পাদন করেন **লুয়েট** (Luyet)। তিনি এ সম্পর্কে ১৯৪০ সালে একটি বই প্রকাশ করেন, যার নাম 'নিম্নতাপমাত্রায় জীবন ও মৃত্যু' (Life and death at low temperature)। ইংল্যাণ্ডে বিজ্ঞানী **স্মিথ** (Smith) ও তার সহযোগীরা এ বিষয়ে প্রচুর পরীক্ষা নিরীক্ষা করেছেন।

বিভিন্ন পরীক্ষা নিরীক্ষার ফলে জানা গিয়েছে যে, জীবদেহ সাধারণ তাপমাত্রার চেয়ে খুব উচ্চ তাপমাত্রা সহ্য করতে পারে না, তাপমাত্রা 50° সেণ্টিগ্রেডের কাছাকাছি গেলেই মৃত্যু ঘটে, কিন্তু অন্যদিকে, তাপমাত্রা কমালে সহসা মৃত্যু ঘটে না। শূন্য ডিগ্রী সেণ্টিগ্রেড তাপমাত্রা অর্থাৎ যে তাপমাত্রায় জল জমে বরফ হয় বা তার 30/40 ডিগ্রী সেণ্টিগ্রেড নীচেও তাপমাত্রা মানুষ সহ্য করতে পারে। কিছু কিছু নিম্নশ্রেণীর জীব আবার আরও নীচে তাপমাত্রা সহ্য করতে পারে। তাপমাত্রা খুব বেশী নামালে দেখা যায় যে, জীবকোষের আপাত মৃত্যু ঘটে অর্থাৎ বাহ্যিকভাবে জীবনের কোন প্রকাশ দেখা যায় না। কিন্তু কোষের অভ্যন্তরে অত্যন্ত মৃদুভাবে জৈবক্রিয়া চলতে থাকে। তাপমাত্রা খুব নীচে নামালে জৈবক্রিয়া স্তব্ধ হয়ে যায়, কিন্তু তা ঠিক মৃত্যু নয়, বরং বলা যায় 'সাময়িক মৃত্যু', কারণ, কিছু পরে আবার তাপমাত্রা বাড়িয়ে দেখা গিয়েছে যে, জৈবক্রিয়া পুনরায় চালু হয়েছে। এইরূপ জীবনকে নাম দেওয়া হয়েছে 'সুপ্ত জীবন' বা 'অব্যক্ত জীবন'। **পোলজ** (Polge), **হুইটিংহাম**

(Whittingham), এ্যাণ্ডারশন (Anderson), গঞ্জালেস (Ganjaless) প্রভৃতি বিজ্ঞানীরা দেখেছেন যে $-150°$ সেণ্টিগ্রেড বা এমনকি $-190°$ সেণ্টিগ্রেড তাপমাত্রায় গরু, মহিষ প্রভৃতি প্রাণীর ডিম্বকোষ বা ভ্রূণকে রাখলে তার ভৌত ও রাসায়নিক ক্রিয়া সাময়িকভাবে বন্ধ হয় বটে, কিন্তু উষ্ণতা বৃদ্ধি করে পুনরায় ঐসব ক্রিয়া চালু করা যায়।

জীবকোষের উপর নিম্নতাপমাত্রার এইরূপ প্রতিক্রিয়াকে নানাভাবে কাজে লাগান হয়েছে, যেমন, রক্ত সংরক্ষণে। অনেক রোগে লোকে রক্তশূন্যতা বা রক্তাল্পতায় ভোগে। কখনও কখনও, কোন অস্ত্রোপচারের পর শরীরের থেকে রক্তক্ষরণ হয়। এইসব কারণে বাইরে থেকে রক্ত শরীরে ঢুকিয়ে দেওয়া হয়। এখন এইজন্য প্রয়োজন সর্বদাই কিছু রক্ত মজুত রাখা। এই উদ্দেশ্যে রক্ত ব্যাঙ্ক গড়ে উঠেছে। কিন্তু বেশীদিন রক্তকে অবিকৃতভাবে সংরক্ষণ করা রক্তব্যাঙ্কের পক্ষে একটা সমস্যা। কিছুকাল পূর্বেও $4°$ ডিগ্রী সেণ্টিগ্রেড তাপমাত্রায় রক্তকে শীতল করে রেখে রক্তকে সংরক্ষণ করা হত। কিন্তু এভাবে মাত্র ২১ দিন পর্য্যন্ত রক্ত ঠিক থাকে, তারপর নষ্ট হয়ে যায়। কিন্তু আধুনিক পদ্ধতিতে রক্তকে অনেকদিন পর্য্যন্ত সংরক্ষিত করে রাখা যায়। এই পদ্ধতিতে যা লুয়েট কর্তৃক ১৯৪৯ সালে আবিষ্কৃত, রক্ত থেকে লোহিত কণিকা সরিয়ে ফেলা হয় এবং গ্লিস্‌রল যোগ করা হয়। তারপর একে $-80°$ সেণ্টিগ্রেড তাপমাত্রায় রাখা হয়। আবার যখন টাটকা রক্ত প্রয়োজন তখন ঐ রক্তকে উষ্ণ করে এবং তার থেকে গ্লিসরল সরিয়ে লোহিত কণিকা যোগ করে রক্তকে আবার স্বাভাবিক করা হবে। কিন্তু লাভলক্ (Lovclock) এবং বিশপ্ (Bishop) ১৯৫৯ সালে দেখিয়েছেন যে, গ্লিসরল এর চেয়ে ডাইমিথাইল সালফোক্সাইড (Dimethyl Sulphoxide) বেশী কার্যকরী।

নিম্নতাপমাত্রার সহায়তায় কোন জীবকোষকে জীবদেহ থেকে বিচ্ছিন্ন করেও দীর্ঘদিন বাঁচিয়ে রাখা যায়। যেমন কিনা, কোন ক্যান্সার রোগগ্রস্ত কোষকে ভাল করে পর্যবেক্ষণ করার জন্য প্রয়োজন তাকে দীর্ঘদিন লক্ষ্য করা। এই উদ্দেশ্যে কোন ক্যান্সার রোগাক্রান্ত কোষকে তরল ক্রিপটন এ (crypton) ডুবিয়ে রাখা হয়। এই অবস্থায় দেখা যায় যে কোষটির স্বাভাবিক বৃদ্ধি বা ক্ষয় সবই সাময়িকভাবে বন্ধ থাকে, কিন্তু কোষটি নষ্ট হয় না। পুনরায় প্রয়োজনমত একে উষ্ণ করে নিলে কোষটি আবার পূর্বের অবস্থায় ফিরে আসে। কিন্তু শুধুমাত্র এইসব ক্ষেত্রেই নয়, জীবদেহের বিভিন্ন অংশ সংরক্ষণের জন্যও নিম্নতাপমাত্রার সাহায্য নেওয়া অপরিহার্য। চক্ষুর কর্নিয়া

প্রভৃতি সূক্ষ্ম অংশ এক দেহ থেকে বিচ্ছিন্ন করে অস্ত্রোপচারের সাহায্যে অন্য দেহে সংযোজিত করা আধুনিক শল্যচিকিৎসার এক উল্লেখযোগ্য কৃতিত্ব। কিন্তু এসব ক্ষেত্রে দেহের ঐ অংশবিশেষ অস্ত্রোপচারের পূর্বেই মজুত করে রাখতে হয়। যার ফলে গড়ে উঠেছে এক নূতন ব্যাঙ্ক, যেমন চক্ষুব্যাঙ্ক, কিডনীব্যাঙ্ক প্রভৃতি। কিন্তু এসব ব্যাঙ্কে জীবদেহের অংশবিশেষকে সঞ্চিত করে রাখতে হলে তাকে যথেষ্ট নিম্নতাপমাত্রায় বিশেষ পদ্ধতিতে হিমায়িত করে সংরক্ষিত করতে হবে। অস্ত্রোপচারের সময় আবার ঐ দেহাংশকে তাপিত করে (Thawing) স্বাভাবিক অবস্থায় ফিরিয়ে আনতে হবে। কিন্তু এইসব দেহাংশকে নিম্নতাপমাত্রায় হিমায়িত করতে হলে তা অত্যন্ত সতর্কতার সাথে এবং 'নিয়ন্ত্রিতভাবে' (controlled) করতে হবে। কেননা হিমায়নের সময় কোষের আভ্যন্তরীণ তরলের মধ্যে বরফ জমতে শুরু করে, যা কোষের পক্ষে অত্যন্ত ক্ষতিকারক হয়ে দাঁড়ায়। আবার, অন্যদিকে ঐ হিমায়িত দেহাংশকে ক্রমিক তাপনের সাহায্যে সাধারণ তাপমাত্রায় ফিরিয়ে আনার সময় তাপমাত্রার বৃদ্ধির হারও যথোপযুক্ত (Optimum) হওয়া দরকার। তা না হলে নানা সমস্যার উদ্ভব হতে পারে। দেখা গিয়েছে যে, খুব দ্রুত তাপন বা খুব শ্লথ-তাপন এ দুয়ের কোনটিই সুবিধাজনক পদ্ধতি নয়। সম্প্রতি (১৯৭৭ সালে) বার্ডিট (Burdette), ক্যারো (Karow), জেস্কে (Jeske) প্রভৃতি বিজ্ঞানীরা একপ্রকার তড়িৎচুম্বকীয় প্রতিপ্রভা (Electromagnetic Illumination) পদ্ধতি ব্যবহার করে চমৎকার ফল পেয়েছেন। তাঁরা খরগোস, কুকুর প্রভৃতি প্রাণীর বৃক্কের (Kidney) হিমায়িত অংশবিশেষকে এই পদ্ধতিতে তাপিত করে পুনরায় স্বাভাবিক অবস্থায় আনতে সফল হয়েছেন।

বিভিন্ন রোগের সংক্রমণ সম্পর্কে সঠিকভাবে জানতে হলে এবং তার প্রতিকার করতে হলে সেই রোগজীবাণুগুলিকে ভালভাবে পর্যবেক্ষণ করা প্রয়োজন। সেজন্য, তাদের সংরক্ষিত করে রাখতে হলে নিম্নতাপমাত্রার সাহায্য আবশ্যক। টার্নার (Turner) ও ফ্লেমিং (Fleming) ১৯৩৯ সালে দেখিয়েছেন যে, ইনফ্লুয়েঞ্জা, পীতজ্বর প্রভৃতি রোগের অতিক্ষুদ্র জীবাণু (যাকে ভাইরাস বলা হয়) -76° সেণ্টিগ্রেড তাপমাত্রায় হিমায়িত করার প্রায় ছয়মাস পরেও তাদের কার্যকারিতা অক্ষুণ্ণ থাকে। এইরূপে নিম্নতাপমাত্রার সাহায্যে শুক্রকীটকে ও ডিম্বকোষকে দীর্ঘদিন সঞ্চিত করে রাখা যায় এবং প্রয়োজনমত কৃত্রিম প্রজনন কার্যেব্যবহার করা যায়। আবার এও দেখা গিয়েছে যে, কোন জীবকোষকে তরল নাইট্রোজেনের তাপমাত্রায় রাখলে, তার উপর রঞ্জনরশ্মি (X-ray) বা গামা রশ্মি (γ-ray) খুব সামান্য প্রতিক্রিয়া সৃষ্টি করে।

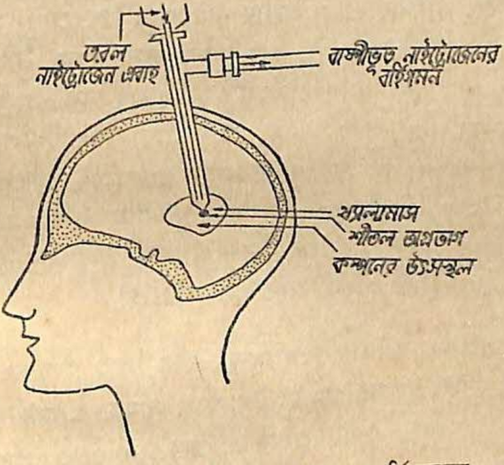
কোন কোন বিজ্ঞানী কল্পনা করেছেন যে, মহাকাশ অভিযানে যে সময় লাগবে, সেই দীর্ঘকাল মহাকাশযানে অভিযাত্রীদের দেহ নিম্নতাপমাত্রায় রাখা হবে। সেইসময় ব্যাপী তাদের দেহের সকল ক্রিয়া স্তব্ধ থাকবে এবং কোন ক্ষয় হবে না। এইভাবে দীর্ঘকাল মানুষকে 'মমী' করে রেখে এবং দরকার মত পুনর্জীবিত করে বহু সুদূর নক্ষত্রলোকে পাড়ি দেওয়া চলবে। আবার, এই পদ্ধতির সাহায্যে মাটীর পৃথিবীতেও মানুষ দীর্ঘকাল মৃত্যুকে ঠেকিয়ে রাখবে। যখন প্রয়োজন হবে, তখন কোন মানুষের দেহ অত্যন্ত নিম্নতাপমাত্রায় রাখা হবে। এভাবে পাঁচশো বা হাজার বৎসর অতিক্রান্ত হলে আবার তাকে বাঁচিয়ে তোলা হবে। এভাবে মানুষ শতাব্দীর পর শতাব্দী বেঁচে থাকবে। যদিও এখন এটা গল্পকথা বলে মনে হচ্ছে, কিন্তু অদূর ভবিষ্যতে এটা সম্ভব হবে কিনা কে বলতে পারে। **জুলে ভার্ণের** অনেক পরিকল্পনা সমসাময়িক কালে কল্পনা বলেই মনে করা হয়েছিল, কিন্তু পরবর্তীকালে তার 'কল্পনা'গুলির অনেকগুলিই বাস্তবরূপ পেয়েছে।

নিম্নতাপমাত্রায় শল্য চিকিৎসা

নিম্নতাপমাত্রার প্রয়োগ চিকিৎসা শাস্ত্রে, বিশেষতঃ শল্য চিকিৎসায় একটি নূতন দিগন্ত উন্মুক্ত করেছে। নিম্নতাপমাত্রাকে শল্য চিকিৎসায় দুভাবে কাজে লাগান হয়, প্রথমতঃ মানুষের দেহের তাপমাত্রা খুব নামিয়ে তাকে সহজেই অজ্ঞান করা যায় এবং দ্বিতীয়তঃ, শরীরের কোন স্নায়ুর জটিল অস্ত্রোপচারে, যেখানে দেহে অস্ত্রোপচারের স্থানটি অত্যন্ত সঠিকভাবে স্থির করা প্রয়োজন, সে স্থানটি তরল নাইট্রোজেনের সাহায্য নিয়ে সহজেই বের করা যায়।

প্রথমটির কথা আগে বলা যাক। তরলায়িত গ্যাসের সাহায্যে দেহের তাপমাত্রা নামিয়ে দিলে শরীরের সব জৈবক্রিয়াগুলি স্তিমিত হয়ে পড়ে। রক্ত সঞ্চালন অত্যন্ত মন্থর গতিতে চলে, ফলে ক্ষত দিয়ে সামান্য মাত্রায় রক্তস্রাব হয়। ফলে অস্ত্রোপচার খুব সহজেই করা যায়। দেহের তাপমাত্রা খুব কমে গেলে দেহের অক্সিজেনের আবশ্যকতা খুবই কমে যায় এবং হৃদপিণ্ড অনেকক্ষণ পর পর রক্ত সঞ্চালিত করে। ফলে, হৃদপিণ্ডে অস্ত্রোপচার করার সময় ঐখানে খুব বেশী রক্ত থাকে না। এর ফলে অস্ত্রোপচারজনিত রক্ত মোক্ষনের ভয় থাকে না।

নিম্নতাপমাত্রার প্রয়োগের ফলে একটি জটীল রোগের অস্ত্রোপচার নিরাপদে করা সম্ভব হয়েছে, তা হল পার্কিনসনস্ ডিজিজ্ (Parkinson's disease) নামে কেন্দ্রীয় স্নায়ুতন্ত্রের একটি বিশেষ রোগ। এই অস্ত্রোপচারের সময় প্রথমে রোগীর আক্রান্ত স্থানটি অবশ করে দেওয়া হয়। তারপর, মস্তিষ্কের মধ্যে অবস্থিত থ্যালামাস (Thalamus) গ্রন্থির ভিতর ক্যানুলা (Cannula) নামে একটি সরু সূচের মত জিনিস প্রবেশ করিয়ে দেওয়া হয় (ছবি দ্রষ্টব্য), দ্রুত রঞ্জনরশ্মি ফটোগ্রাফের সাহায্যে ঐ ক্যানুলায় গতি লক্ষ্য করা হয়।



৫৬ নং চিত্র—নিম্নতাপমাত্রার প্রয়োগে পার্কিনসনস্ ডিজিজ্ এর চিকিৎসা।

ক্যানুলাটির মধ্যে একটি সূক্ষ্ম নল দিয়ে তরল নাইট্রোজেন প্রবাহিত করান হয়। তার ফলে, ক্যানুলাটির অগ্রভাগের তাপমাত্রা অত্যন্ত কম হয়। ঐটির চতুপার্শ্বস্থ মস্তিষ্কের অংশবিশেষ ঠাণ্ডায় প্রায় জমে যায়। এখন, ক্যানুলাটি একটু একটু করে সরাতে সরাতে যে স্থানে পৌঁছলে দেখা যায় যে রোগীর দেহের কম্পন থেমে গিয়েছে, সেই স্থানটিই আক্রান্ত স্থান বলে গণ্য করতে হবে। তখন সেই স্থানের তাপমাত্রা -40° সেন্টিগ্রেডে নামিয়ে কিছুক্ষণ রাখতে হবে। তাহলে ঐ স্থানটি, যা ক্যানুলার গতিকে নিয়ন্ত্রণ করছে, সুস্থ হয়ে উঠবে। এই প্রক্রিয়ায় মস্তিষ্কের অন্যান্য অংশের কোন ক্ষতি হয় না। এইভাবে নিম্নতাপমাত্রার সাহায্য নিয়ে নানাপ্রকার জটীল চিকিৎসা করা হচ্ছে।

অতিশীতল চুম্বক

অনেকদিন থেকে বিজ্ঞানীরা চিন্তা করে এসেছেন এমন কি ধরণের তড়িৎ-চুম্বকের, যা ধাতুর অতিতড়িৎপরিবাহী অবস্থায় কাজ করবে। এরকম চুম্বকের সুবিধে হল যে, এরকম তড়িৎচুম্বকে তড়িৎপ্রবাহ কখনই নষ্ট হবে না। ফলে চুম্বক ক্ষেত্রটি চিরস্থায়ী হবে। যদিও অতি নিম্নতাপমাত্রা নিয়ে গবেষণা ও পরীক্ষা নিরীক্ষায় এরকম একটি চুম্বকের সম্ভাবনা উন্মুক্ত করেছে, তবুও এটা তৈরী করা খুব সহজ হয় নি। কারণ, যে শক্তিশালী চুম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি হয়েছে সেটাই অতিতড়িৎ পরিবাহীতাকে আবার নষ্ট করে দিয়েছে। অবশেষে, অনেক পরীক্ষানিরীক্ষার ফলে এটা তৈরী করা সম্ভব হল, যখন বিজ্ঞানীরা দেখলেন যে, চৌম্বকক্ষেত্রে 'কঠিন' অতিতড়িৎপরিবাহীগুলির অতিতড়িৎপরিবাহী ধর্ম সহজে নষ্ট হয় না, যা কিনা 'নরম' অতিতড়িৎপরিবাহীগুলির ক্ষেত্রে ঘটে। এখন, কোনগুলি 'নরম' অতিতড়িৎপরিবাহী তা পূর্বেই আলোচিত হয়েছে। মোটামুটিভাবে বলা যেতে পারে যে, এ্যালুমিনিয়াম, টিন, পারদ, সীসা প্রভৃতি হল 'নরম' অতিতড়িৎপরিবাহী এবং নিওবিমিয়াম্-টিন, ভ্যানাডিয়াম—গ্যালিয়াম প্রভৃতি ধাতব যৌগগুলি 'কঠিন' অতিতড়িৎপরিবাহী।

এরকম 'কঠিন' অতিতড়িৎপরিবাহী ধাতু দিয়ে যে চুম্বক তৈরী হয়, তার সাথে সাধারণ তড়িৎ চুম্বকের পার্থক্য কিরূপ তা সামান্য একটা উদাহরণ দিলে বোঝা যাবে। এরূপ একটি চুম্বক যা প্রায় ৫০,০০০ গস্ চুম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি করতে পারে, তার ওজন হবে মাত্র এক পাউণ্ডের মত এবং ৬ ভোল্টের ব্যাটারীর সাহায্যে চালান যায়। আর সেখানে অনুরূপ চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি করতে সক্ষম একটি সাধারণ তড়িৎপরিবাহী চুম্বক তৈরী করলে তার ওজন হবে কয়েক টন এবং তাকে চালাতে প্রায় ৫০ কিলো ওয়াট তড়িৎশক্তির প্রয়োজন হবে। আর, এই চুম্বকের চৌম্বক ক্ষমতা ধীরে ধীরে কমে যাবে, কিন্তু অতি-তড়িৎপরিবাহী চুম্বকের চৌম্বক ক্ষেত্র একই থাকবে।

এই প্রসঙ্গে বলা যায় যে, ধাতুর অতিতড়িৎপরিবাহী অবস্থাকে কাজে লাগিয়ে নূতন ধরণের ট্রান্সফর্মার নির্মাণ করা সম্ভব হয়েছে, যাতে 'সেকেণ্ডারী' কুণ্ডলীকে অতিতড়িৎপরিবাহী তাপমাত্রায় রাখলে তাতে তড়িৎপ্রবাহ কখনই নষ্ট হবে না। এরূপ ট্রান্সফর্মারগুলি আকারেও খুবই ছোট হয় এবং তার ফলে ঐগুলি তৈরী করতেও কম খরচ হয়। এর ফলে কোনরূপ ক্ষয় ছাড়াই দূর-দূরান্তরে তড়িৎ পাঠান যায়।

এছাড়া, অতিতড়িৎপরিবাহী চুম্বকের আরও কিছু ব্যবহার বলা যায়। যেমন, অতিতড়িৎপরিবাহী চুম্বক ব্যবহার করে অতি সামান্য তড়িৎপ্রবাহের সাহায্যে অতি শক্তিশালী চুম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি করা যায়। অথচ ঐরূপ তড়িৎচুম্বকের ওজন খুব বেশী হয় না।

অতিতড়িৎপরিবাহী সুইচ

আমরা আগেই আলোচনা করেছি যে, অত্যন্ত নিম্নতাপমাত্রায় 4° কেলভিনের কাছাকাছি, অনেক ধাতুই অতিতড়িৎপরিবাহী হয়ে ওঠে। এই অতিতড়িৎ-পরিবাহীগুলির সাহায্যে এক ধরনের সুইচ তৈরী করা যায়, যা অত্যন্ত কম সময়ে কাজ করে। যেমন, নিওবিয়াম ও ট্যাণ্টালাম্ তার দিয়ে যে অতিতড়িৎপরিবাহী সুইচ তৈরী করা হয়, তার কাজ করতে প্রায় 150 মাইক্রোসেকেণ্ড সময় লাগে। আবার, ধাতুর সূক্ষ্ম আস্তরণ (Thin Film) স্তরে স্তরে জমিয়ে যে অতিতড়িৎ-পরিবাহী সুইচ তৈরী করা হয়, সেগুলি আরও দ্রুত গতিতে কাজ করে। এসব সুইচের জন্য আধুনিক কমপিউটার বা যন্ত্রগণকগুলির চেহারা পালটে গিয়েছে।



৫৭নং চিত্র—'সাধারণ' ও 'অতিতড়িৎপরিবাহী' স্মৃতি অংশের আকারের তুলনা।

এই অতিতড়িৎপরিবাহী সুইচগুলি যন্ত্রগণকের 'স্মৃতি' (memory) অংশ তৈরী করতে ব্যবহৃত হয়। অতিতড়িৎপরিবাহী সুইচ এর সাহায্য নিয়ে যে 'স্মৃতি'

অংশ তৈরী করা হয়, তা অত্যন্ত ছোট হয় এবং অত্যন্ত দ্রুত গতিতে কাজ করতে পারে। এই অতিতড়িৎপরিবাহী সুইচগুলি কাজ করার জন্য 'স্মৃতি' অংশকে তরল হিলিয়ামের মধ্যে ডুবিয়ে রাখা হয়। ছবিতে কমপিউটারের সাধারণতঃ ব্যবহৃত 'স্মৃতি' অংশ এবং অতিতড়িৎপরিবাহী 'স্মৃতি' অংশকে পাশাপাশি রেখে তাদের আকারের তুলনা বোঝান হয়েছে।

বিভিন্ন দিকে হিমায়ন-বিদ্যার প্রয়োগ

আধুনিক বিজ্ঞানের আরও বিভিন্ন দিকে নিম্নতাপমাত্রার যথাযথ প্রয়োগ খুবই সাফল্য এনে দিয়েছে। তারই কয়েকটি সম্বন্ধে খুব সংক্ষেপে এখানে আলোচনা করছি।

যেমন, প্রথমে ধরা যায় মেজার ও লেজার—বিজ্ঞানের এই দুই অভিনব আবিষ্কারের কথা। মেজার কথাটি হচ্ছে সংক্ষিপ্ত (abbreviation) শব্দ। সম্পূর্ণ কথাটি হল—মাইক্রোওয়েভ এ্যামপ্লিফিকেশন্ বাই ষ্টিমুলেটেড্ এমিশন্ অব্ রেডিয়েশন্ (Microwave amplification by stimulated emmission of radiation)। এর সাহায্যে মাইক্রোতরঙ্গ (Microwave) শক্তিকে বর্দ্ধিত (emplify) করার জন্য অণু ও পরমাণুর শক্তিস্তরগুলির মধ্যে উল্লম্ফনকে(transition) কাজে লাগান হয়। অণু বা পরমাণুর স্বাভাবিক শক্তিস্তর বা ভূমিস্তর (Ground state) থেকে উচ্চে কতকগুলি আভ্যন্তরীণ শক্তিস্তরকে কোন বিশেষ স্পন্দনসংখ্যার সংকেতের (signal) সাহায্যে উত্তেজিত করা হয়, ফলে অণু বা পরমাণু উজ্জীবিত (Stimulated) হয়ে প্রযুক্ত সংকেতটির সমদশায় (Same Phase) শক্তি বিকিরণ করে, যার জন্য সংকেতটি অনেকগুণ বৃদ্ধি পায়। যেহেতু একটি মাত্র পরমাণুর থেকে যে শক্তি পাওয়া যাবে তা খুবই সামান্য, প্রচুর সংখ্যক অণুর শক্তিকে কাজে লাগান হয়, যাতে কিনা ব্যবহারযোগ্য শক্তি পাওয়া যায়। পরমাণুগুলির কোনরূপ সমাহারকে (aggregation) কাজে লাগান সুবিধা হয়, যেমনটি কেলাসে পাওয়া যায়। এইজন্য মেজারের উদ্দেশ্যে চুনী (Ruby) কেলাস ব্যবহার করা হয়, অবশ্য আজকাল চুনী ছাড়াও অন্যান্য অনেক জিনিষ এই উদ্দেশ্যে ব্যবহার করা হয়।

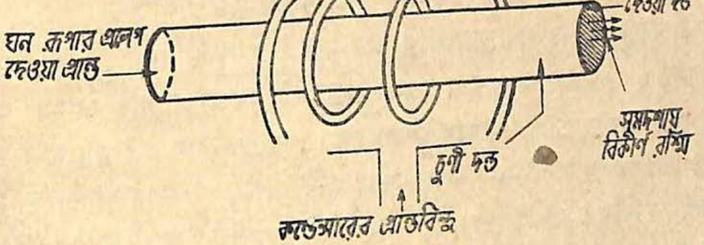
এখন, মেজারের জন্য কেলাসগুলিকে নিম্নতাপমাত্রায় রেখে কাজ করতে হয়। তা না হলে পরমাণুগুলির তাপস্পন্দনগুলি (Thermal Vibration) মাইক্রোতরঙ্গ শক্তির অবশোষণ-বিকীরণের (adsorption-emmission) অন্তরায়

হবে। উপরন্তু নিম্নতাপমাত্রায় দুইটি শক্তিস্তরের পরমাণুর গণসংখ্যার (population) মধ্যে প্রভেদ বেশী হয়, যা কিনা মেজার প্রক্রিয়ার জন্য একান্ত প্রয়োজন। এইজন্য, তরল হিলিয়ামের তাপমাত্রায় মেজার-কার্য সবচেয়ে ভাল হয়।

সাধারণ মাইক্রোতরঙ্গ বর্ধক (amplifire) গুলির তুলনায় মেজার বর্ধকগুলির 'কোলাহল' (noise) খুবই সামান্য। এইজন্য বেতার দূরবীক্ষণ (radio telescope) যন্ত্রে, যা কোন বহু আলোকবর্ষ দূরের কোন জ্যোতিষ্ক থেকে আগত কোন বেতার সংকেতকে গ্রহণ করে এবং সনাক্ত করে, মেজার বিবর্ধক ব্যবহার হয়। কারণ, ঐ সুদূর জ্যোতিষ্ক থেকে আগত সংকেত (Signal) অত্যন্ত ক্ষীণ হয়, কাজেই সেগুলি বর্ধিত করতে 'কোলাহল' খুবই সামান্য হওয়া দরকার। যোগাযোগ রক্ষাকারী কৃত্রিম উপগ্রহগুলিতেও মেজার বর্ধক ব্যবহৃত হয়।

মাইক্রোতরঙ্গের পরিবর্তে আলোক তরঙ্গের শক্তিকে বর্ধিত করা হয় লেজার প্রক্রিয়ায়, যার সম্পূর্ণ নাম হল লাইট্ এ্যামপ্লিফিকেশন্ বাই ষ্টিমুলেটেড্ এমিশন্ অব্ রেডিয়েশন্। এইজন্য লেজারকে বীক্ষণাত্মক মেজারও (optical maser) বলা হয়।

লেজারের ক্ষেত্রে ও উজ্জীবিত বিকীরণ সমদশায় (same phase) ঘটে, ফলে বিকীরণ অত্যন্ত তীব্র হয়। লেজারের ক্ষেত্রে কয়েকগুচ্ছ কনডেনসারকে (Condenser) একটি উচ্চ তীক্ষ্ণতা সম্পন্ন (Intensity) ফ্ল্যাশ-টিউব (flash tube) এর মাধ্যমে বিত্রায়নিত (discharged) করা হয়। এর ফলে চূণী



৫৮ নং চিত্র—লেজার ক্রিয়া।

কেলাসের ক্রোমিয়াম আয়নগুলি উত্তেজিত স্তরে উপনীত হয়। যখন ঐ আয়নগুলি আবার স্বাভাবিক বা নিম্নতম শক্তিস্তরে নেমে আসে, তখন তারা তীব্র লালরশ্মি বিকীরণ করে। যাতে বহু সংখ্যক পরমাণু একই দশায় বিকীরণ করে, তার জন্য চুনী কেলাসের একমুখে গাঢ় রূপার প্রলেপন এবং অন্য মুখে হালকা রূপার প্রলেপন দেওয়া হয়। লক্ষ্য করা গিয়েছে যে, নিম্নতাপমাত্রায়

লেজারের ক্রিয়া ভালো হয়। এমন কি, কিছু কিছু কেলাস শুধু নিম্নতাপমাত্রায়ই লেজার ক্রিয়া প্রদর্শন করে।

এছাড়া নিম্নতাপমাত্রার অন্যান্য প্রয়োগের মধ্যে একটি হল প্লাজমা পদার্থবিদ্যা (Plasma Physics)। প্লাজমার জন্য একদিকে যেমন প্রচণ্ড প্রজ্জ্বলন উত্তাপ (Kindling temperature) প্রয়োজন হয়, অন্যদিকে তেমনই অত্যন্ত শক্তিশালী চুম্বকের প্রয়োজন হয়। কিন্তু সাধারণভাবে শক্তিশালী চুম্বক সৃষ্টি করতে গেলে প্রচুর তড়িৎশক্তির প্রয়োজন হয়। যার ফলে, মোট ব্যয়িত শক্তির তুলনায় প্লাজমা থেকে যে শক্তি পাওয়া যাবে তা কার্যকরী হবে না। কিন্তু পূর্বেই আলোচিত হয়েছে নিম্নতাপমাত্রায় অতিতড়িৎপরিবাহী দিয়ে চুম্বক তৈরী করলে, সামান্য শক্তি ব্যবহার করে অতিশক্তিশালী চুম্বক সৃষ্টি করা যায়। কাজেই, প্লাজমার জন্য এইরূপ অতিতড়িৎপরিবাহী চুম্বক ব্যবহার করা সবচেয়ে কার্যকরী এবং তারজন্য উপযুক্ত নিম্নতাপমাত্রা সৃষ্টি করা দরকার।

হিমায়ন বিদ্যার অন্যতম উল্লেখযোগ্য প্রয়োগ হয় পরমাণু গবেষণায়। যেমন, উদাহরণস্বরূপ, বুদবুদ প্রকোষ্ঠ (Bubble Chamber)এর কথা বলা যায়। কোন পরমাণুকে প্রচণ্ড শক্তিসম্পন্ন পরমাণু-কণিকা দিয়ে আঘাত করার পর কণাগুলির গতিপথ ও গতিবেগ বিশ্লেষণ করে তাদের সম্পর্কে অনেক কিছু তথ্য জানা যায়। এর একটি অন্যতম কার্যকরী উপায় হল, কণাগুলি যদি তড়িৎ আধানসম্পন্ন বা আয়নিত হয়, তাহলে তাদের একটি তরল হাইড্রোজেন পূর্ণ প্রকোষ্ঠের মধ্য দিয়ে চালিত করা হয়। তরল হাইড্রোজেনের প্রতি একক আয়তনে সমপরিমাণ প্যারাফিনের থেকে অনেক বেশী হাইড্রোজেন কেন্দ্রীন (nucleus) থাকে। ফলে সংঘর্ষের পরিমাণ বেশী হয়।

উচ্চচাপে তরল হাইড্রোজেনকে তার স্বাভাবিক স্ফুটনাংকের ঊর্দ্ধ তাপমাত্রায় রাখা হয়। শক্তি সম্পন্ন কণা তরল হাইড্রোজেনের মধ্য দিয়ে চালনা করার ঠিক পূর্বে তার চাপ কমিয়ে ফেলা হয়। ফলে, তরল হাইড্রোজেনটি অতি উত্তপ্ত (Superheated) হয় এবং বুদবুদ সৃষ্টি করার অবস্থায় উপনীত হয়। কাজেই আয়নিত কণাগুলির সাথে সংঘর্ষজনিত ক্ষুদ্র বুদবুদগুলির পথ (track) সৃষ্টি হয়। এখন কোন তড়িৎ চুম্বকক্ষেত্রে রাখলে, কণাগুলির তড়িৎ আধান, বেগ ও ভর অনুযায়ী তাদের গতিপথগুলি বিভিন্ন মাত্রায় বেঁকে যাবে। এই গতিপথের ছবি তুলে তা বিশ্লেষণ করলে কণাগুলির সম্বন্ধে অনেক তথ্য জানতে সুবিধা হবে। এছাড়া পরমাণু গবেষণার অন্যান্য অনেক ক্ষেত্রেই নিম্নতাপমাত্রার প্রয়োজন হয়।

গ্রন্থপঞ্জী

1. White, G. K., 'Experimental Techniques in Low-temperature Physics', Oxford University Press, N. J., 1959.
2. Zemansky, M. W., 'Heat & thermodynamics', McGraw-Hill, New York, 1968.
3. Saha, M. N. & Srivastana, B. N., 'A Treatise on Heat', Indian Press Pvt. Ltd., Allahabad, 1931.
4. Mendelssohn K ; 'Cryophysics', International Publishor, Inc., New York, 1960.
5. Mendelsshon, K ; 'Quest for Absolute Zero', Mc-Graw Hill, New York. 1966.
6. Dugdale, J. S., 'Entropy & Low Temperature Physics'. Hutchinson & Co. Ltd., London, 1966.
7. Shoenberg, D., 'Superconductivity', Cambridge University Press, New York, 1952.
8. Mendelssohn, K. & Rosenberg, H. M., 'Solid State Physics', Vol. 12, Academic Press, New York, 1961.
9, Powel, R. L., 'Properties of Materials at low temperature', Phase I, A compendium, Pergamon Press, Oxford, 1961.
10. 'Cryogenics Survey & Outlook', National Committee on Science & Technology, Government of India, April 1973.
11. Hand book Der Physik (Low Temperature Physics), Vol. IVX.
12. Low Temperature Physics, L. C. Jackson.
13. Cryogenic Engineering, Russel B. Scott.
13. Heat & Thermodynamics, Roberts & Miller.
15. Low temperature Physics, Charles F. Squire.
16. Cryogenics, Marshall Sitting.
17. Cryogenics, Mendelsshon.
18. Nature, August, 1908.
19. Pro. Roy. Soc. Lond., 147, 189, 1934.

20. Leiden Communication, No. 108 (1908).
21. Superconductivity, D. Shoenberg, Cambridge University Press, 1952.
22. Theory of Superconductivity, M. Von Laue, New York, Academic Press, 1952.
23. Polge, C, 'Freezing Eggs & Embryos of Farm Animals', Cryobiology, 1977.
24. K. Elliot & J. Whelan, Report on 'The freezing of Mammalian Embryos', Ciba Foundation Symposium 52, 1977.
25. H. T. Meryman, Cryobiology, 1966, Academic Press, London.

পরিভাষা

অবরোহণ—Cascade
অংশকারকস্তম্ভ—Fractionating Column
অন্তরিত—Insulated
অতিতড়িৎপরিবাহী, অতিপরিবাহী—Super Conductor
অসামঞ্জস্য—Anamoly
অপ্রাপণীয় বক্তব্য—Unattainable Statement
অর্ধপরিবাহী—Semi-Conductor
অপসারক—Remover
অবিশুদ্ধতা—Impurity
অতিতড়িৎপরিবাহীতা, অতিপরিবাহীতা—Super Conductivity
অতিপ্রবাহতা—Super fluidity
অন্তরক—Alternating
অনুদান—Contribution
অবশোষণ-বিকিরণ—Absorption-Emmission

অতিউত্তপ্ত—Superheated

আন্তঃআণবিক—Inter molecular
আপেক্ষিক রোধ—Specific resistence
আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহ—Induced current

আপেক্ষিক—Specific
আপেক্ষিক আয়তন—Specific volume

ইলেকট্রনীয়—Electronic
ইলেকট্রন জোড়—Electron pair

ঋজুতা—Rigidity

এককেলাসী—Single crystal
একযোজী—Monovalent
এক্সপোনেণ্টভাবে—Exponentially
এনট্রপি—Entropy

উৎক্রম তাপমাত্রা—Inversion Temperature
উভমুখী—Revesible
উল্লম্ফন—Transition
উত্তেজিত—Excited
উদ্বায়ক—Evaporator
উৎক্ষেপণ—Launching

কেলাসজালিক—Lattice
কঠিন অতিপরিবাহী—Hard Super Conductor
কার্যচক্র—Working cycle
কোয়াণ্টাম বলবিদ্যা—Quantum Mechanics
কোয়াণ্টামস্থান—Quantum space
কোয়াণ্টাম সমষ্টিবিদ্যা—Quantum Statistical Mechanics
কোলাহল—Noise
কেন্দ্রীণ—Nucleus
কেন্দ্রীয় বিচুম্বকন—Nuclear demagnetisation
কুরীতাপমাত্রা—Curie Temperature
কৃত্রিম প্রজনন—Artificial fertilization

ক্ষার ধাতু—Alkali metals
ক্ষার জাতীয় মৃত্তিকাধাতু—Alkaline Earth Metals

গ্যাসনিশ্ছিদ্র—Gas tight
গণসংখ্যা—Population
গতিশীল কপাট—Sliding Valve
গিবস্ অপেক্ষক—Gibbs function

ঘূর্ণী—Eddicurrent
ঘনীভবন—Condensation
ঘনীভবন তল—Condensing surface
ঘনীভবন কুণ্ডলী—Condenser coil
ঘর্ষণ—Friction
ঘাত—Stroke

চৌম্বক গ্রাহীতা—Susceptibility
চুনী কেলাস—Ruby crystal
চাপ—Pressure
চাপতাপমাত্রা রেখা—Pressure-temperature curve
চুম্বকাণু—Molecular Magnet
চৌম্বকন—Magnetization

ছেদ—Discontinuity

ঝরণা প্রতিক্রিয়া—Fountain Effect

টানদৃঢ়তা—Tensile Strength

ডাইলেকট্রিক—Dilectric

তন্ত্র—System
তড়িৎকুণ্ডলী—Solenoid
তাপমাত্রা—Temperature
তাপসঞ্চালন—Convection of neat
তাপ-বৈদ্যুতিক প্রক্রিয়া—Thermo electric phenomenen
তাপ বিনিময়কারক কুণ্ডলী, তাপবিনিময়ী কুণ্ডলী—Heat exchanger
তাপ নিরোধী—Heat insulated

তাপন—Thawing
তাপহ্রাস করণ—Reduction of heat
তরলীকরণ—Liquefaction
তাপমানক—Calorimeter
তাপ ক্ষমতা—Heat capacity
তড়িৎ আবেশ—Induction
তাপযুগ্ম—Thermo couple
তরলক—Liquefier
তৈলবিভেদক—Oil separator
তাপপরিবহণ ক্ষমতা—Thermal Conductivity
তাপকুণ্ড—Heat sink
তাপ কপাট—Thermal valve
তরল বায়ু—Liquid air
ত্রৈধবিন্দু—Triple point
তরলায়িত—Liquified

থ্রটল প্রসারণ—Throttle expansion
থ্যালামাসগ্রন্থী—Thalamus gland

দেহকেন্দ্রীকঘনক—Body centred cubic
দ্বিপ্রবাহ তত্ত্ব—Two fluid Theory
দ্বিতীয় শ্রেণীর দশান্তর—Second order phase transition

ধনাত্মক আয়ন—Possitive Ion

নিজ আবেশ—Self Induction

প্রথম শ্রেণীর দশান্তর—First order phase change
পরিবর্তন তাপমাত্রা—Tsansition Temperature
পরমশূন্য তাপযাত্রা—Absolute zero Temperature
পূর্ব শীতলীকরণ—Pre-cooling

পোলারিত—Polarised
পাত্র—Reservoir
পরিবাহী—Conductor
পর্যায় সারণী—Periodic Table
প্রজ্বলন উত্তাপ—Ignition Temperature
পুনঃসম্ভৃত প্রক্রিয়ায়—Regenerative process

পৃথকীকরণ—Separation
প্রকাশন—Expression
প্রবাহী—Fluid

ফার্মিডিরাক সাংখ্যায়ন—Fermi Dirac Statistics

বাষ্পচাপ—Vapour Pressure
বাষ্পায়ন—Evaporation
বয়েল তাপমাত্রা—Boyle Temperature
বিচুম্বকন—Demagnetisation
ব্যস্ত অনুপাতী—Inversely proportional
বিদ্ধ দূরত্ব—Penetration Depth
বিশোষণ—Adsorption
বহুকেলাসী—Polycrystalline
বিতারিত—Removed
বোস-আইনস্টাইন সাংখ্যায়ন—Bose-Einstin Statistics
বুদবুদ প্রকোষ্ঠ—Bubble Chamber
বিকীরণ—Emmission
বীক্ষণাত্মক—Optical
বহির্গামী—Outgoing
বর্ধন—Amplification
ব্যবর্তন—Diffraction

ভাস্বর—Luminous
ভৌতক্রিয়া—Physical process

মসৃণ কারক—Lubricating
মাইক্রো তরঙ্গ—Microwave
মুখকেন্দ্রীক ঘনক—Face centred cubic
মিশ্র অঞ্চল—Mixed zone
মসৃণ গতিবিধি—Frictionless motion
মুক্ত প্রসারণ—Free expansion

রুদ্ধতাপ—Adiabatic
রোধ—Resistance
রাসায়নিক বিক্রিয়া—Chemical process

লোহিত কণিকারা—Red Corpuscles
লম্বদূরত্ব—Perpendicular distance
লোরেন্জ সংখ্যা—Lorentz number
লীনতাপ—Latent heat

শক্তিস্তর—Energy states
শক্তিধাপ—Energy lavels
শক্তিফাঁক তত্ত্ব—Energy gap theory
শূন্য বিন্দুশক্তি—Zero point energy
শীর্ষগতি—Vortex motion
শৈত্য—Cooling
শৈত্যধারক—Cooling reservoir
শীতক—Condenser

সমাহার চিত্র—Assembled picture
সমাহার—Aggregation
সমদশা—Same phase
সুপ্ত জীবন—Latent life
সর্বনিম্ন শক্তিধাপ—Lowest energy level

সংকট তাপমাত্রা—Critical Temperature

সাধারণ তড়িৎপরিবাহী—Normal conductor

স্পন্দন—Vibration

সংকর ধাতু—Alloy
সূচক—Indicator
সুস্থির—Stable
সুপরিবাহী—Good conductor
সমতাপ প্রক্রিয়া—Isothermal process
স্থায়ী গ্যাস—Permanent gas
স্থির আয়তন—Constant volume
স্থিরচাপ—Constant pressure
সরল হারমণিক—Simple harmonic
স্মৃতি—Memory
সমএনট্রপিয়—Isentropic
সান্দ্রতা—Viscosity

হিমমিশ্রণ—Freezing mixture
হিমায়ক—Condenser
হিমায়ন—Condensation
হিমকুণ্ড—Cold sink

যোজক—Volume
ইলেকট্রন—Electron

শুদ্ধিপত্র

<table>
<tr><th>পৃষ্ঠা</th><th></th><th>অশুদ্ধ</th><th>শুদ্ধ</th></tr>
<tr><td>৫</td><td>স্তম্ভলেখ ২</td><td>বিশিষ্ট আয়তন</td><td>আপেক্ষিক আয়তন</td></tr>
<tr><td>ঐ</td><td>ঐ</td><td>শীলতাপ</td><td>লীনতাপ</td></tr>
<tr><td>১৬</td><td>১৪ লাইন</td><td>সমগ্র শক্তি</td><td>সমগ্র তাপশক্তি</td></tr>
<tr><td>৬১</td><td>স্তম্ভলেখ ৭</td><td>যে স্তম্ভ আছে</td><td>
<table>
<tr><th>$T°K$</th><th>$p(mm)$</th><th>$T°K$</th><th>$p(mm)$</th></tr>
<tr><td>0·10</td><td>$3{\cdot}4 \times 10^{-32}$</td><td>2·50</td><td>78·92</td></tr>
<tr><td>0·50</td><td>$1{\cdot}6 \times 10^{-5}$</td><td>3·00</td><td>181·2</td></tr>
<tr><td>80</td><td>$1{\cdot}1 \times 10^{-2}$</td><td>3·50</td><td>353·4</td></tr>
<tr><td>1·00</td><td>0·121</td><td>4·00</td><td>615·6</td></tr>
<tr><td>1·59</td><td>3·593</td><td>4·21</td><td>760·0</td></tr>
<tr><td>2·00</td><td>23·45</td><td>4·50</td><td>980·0</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>৯৫</td><td>১৮ লাইন</td><td>দেশান্তর</td><td>দশান্তর</td></tr>
</table>

আধুনিক বিজ্ঞান ও প্রযুক্তিবিদ্যার জগতে নিম্নতাপমাত্রা-বিজ্ঞানের ভূমিকা যথেষ্ট গুরুত্বপূর্ণ। এ সম্পর্কে নবনব গবেষণা একদিকে যেমন বিজ্ঞানের ভাণ্ডারকে সমৃদ্ধতর করছে, তেমনই অপরপক্ষে এই বিষয়টির প্রায়োগিক ক্ষেত্রও দিনদিন প্রসারিত করছে। নিম্নতাপমাত্রা-বিজ্ঞান সম্পর্কে সঠিক ধারণা ব্যতীত পদার্থ বিজ্ঞানের শিক্ষা সম্পূর্ণ হয় না। তাই পদার্থ বিজ্ঞানের উচ্চস্তরের পাঠক্রমে বিষয়টি অন্তর্ভুক্ত হয়েছে। কিন্তু বিষয়বস্তুগত দুরূহতার ফলে ছাত্রছাত্রীদের কাছে সহজবোধ্য পরিবেশনার প্রয়োজনীয়তার গুরুত্ব অসীম; কারণ সেভাবেই একমাত্র তাদের মনে নিম্নতাপমাত্রা-বিজ্ঞান সম্পর্কে সঠিক ধারণা গড়ে উঠতে পারে। ডক্টর দিলীপ চক্রবর্তী কর্তৃক লিখিত "নিম্নতাপমাত্রা-বিজ্ঞান" পুস্তকটি স্নাতক সাম্মানিক ও উত্তরস্নাতকস্তরের পাঠ্যসূচীভুক্ত বিষয়বস্তুর আলোচনায় সমৃদ্ধ। এছাড়াও বিষয়টির উপর একটি সাধারণ ভূমিকা হিসাবেও গ্রন্থটি উল্লেখযোগ্য।

বার টাকা